

**DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA
SEDIMENTACIÓN TIPO II CON DIFERENTES COAGULANTES COMERCIALES
A NIVEL LABORATORIO.**

**OSCAR IVÁN ORDUZ PAUNA
JESSICA CRISTINA PORTILLA NARVÁEZ**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2017**

**DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA
SEDIMENTACIÓN TIPO II CON DIFERENTES COAGULANTES COMERCIALES
A NIVEL LABORATORIO.**

**OSCAR IVÁN ORDUZ PAUNA
JESSICA CRISTINA PORTILLA NARVÁEZ**

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

**Director
Felipe Santamaría Alzate
Ingeniero Civil**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2017**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5 CO)

Esto es un resumen legible por humanos del [Texto Legal \(la licencia completa\)](#).

[Advertencia](#)

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

ING. FELIPE SANTAMARÍA ALZATE
Director de Proyecto

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, 17, Mayo, 2017

DEDICATORIA

Este trabajo va dirigido a todas aquellas personas y empresas que de una u otra forma se desempeñan en el sector hidráulico.

A nuestros padres quienes han ofrecido su apoyo incondicional en cada uno de nuestros procesos de formación como profesionales.

A nuestro tutor Felipe Santamaría quien ha entendido, tolerado y ayudado con nuestra idea de innovar por encima de la filosofía.

A todas las personas que nos ayudaron a superar las dificultades, amigos y profesores, que aportaron su grano de arena, muy importante en este proceso.

OIOP.
JCPN.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, expresar nuestro agradecimiento a Dios, padre creador de todo, por darnos las fuerzas en momentos de tropiezos, por permitirnos sobresalir de la mejor manera en este proyecto.

Gracias, de corazón, a nuestros padres que son los promotores de nuestra lucha constante por ser excelentes profesionales.

Gracias, a nuestro tutor, Felipe Santamaría Alzate por su paciencia, dedicación y motivación, ya que sin su gran apoyo no hubiese sido posible el desarrollo de este trabajo; fue un privilegio haber podido contar con su ayuda.

Gracias al señor Javier Mendoza, laboratorista de la universidad, quien nos guio y ayudó de la mejor manera.

Gracias a todas aquellas personas, amigos y profesores que ofrecieron su apoyo incondicional, contribuyendo enormemente al desarrollo de este trabajo.

Muchas gracias a todos.

OIOP.
JCPN.

Tabla de contenido

GLOSARIO.....	12
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. GENERALIDADES.....	17
1.1 ANTECEDENTES	17
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 General	21
1.3.2 Específicos.....	21
1.4 JUSTIFICACIÓN	22
1.5 MARCO DE REFERENCIA.....	23
1.5.1 Marco teórico	23
1.5.1.1 Sedimentación.	23
1.5.2 Marco conceptual.....	29
1.5.2.1 El agua.....	29
1.5.2.2 Coagulación	31
1.6 METODOLOGÍA	33
2. ESTADO DEL ARTE DE LA SEDIMENTACIÓN TIPO II.....	35
2.1 GENERALIDADES.....	35
2.2 MÉTODO SEDIMENTACIÓN TIPO II.....	36
2.3 TORRE DE SEDIMENTACIÓN	39
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	40
3.1 PREPARACIÓN DE AGUA PROBLEMA	40
3.2 TEST DE JARRAS.....	42
3.2.1 Sulfato de aluminio tipo A.	42
3.2.2 Sulfato de aluminio tipo B.	44
3.2.3 Cloruro férrico.	46
3.2.4 Polyfloc.	47
3.2.5 Mackenfloc.....	49
3.3 COMPARACIÓN DE LOS COAGULANTES	51
3.4 SEDIMENTACIÓN TIPO II MEDIANTE LA TORRE DE SEDIMENTACIÓN	52
3.4.1 Análisis del cloruro férrico en el agua problema	53
3.4.1.1 Primera prueba cloruro férrico.	53
3.4.1.2 Segunda prueba cloruro férrico.....	57
3.4.2 Análisis de sulfato de aluminio tipo A en el agua problema	63
3.4.2.1 Primera prueba de sulfato de aluminio tipo A.	63
3.4.2.2 Segunda prueba de sulfato de aluminio tipo A	67
3.4.3 Análisis sulfato de aluminio tipo B en el agua problema	73

3.4.3.1	Primera prueba de sulfato de aluminio tipo B.	73
3.4.3.2	Segunda prueba de sulfato de aluminio tipo B.	77
3.5	ANÁLISIS DEL %DE REMOCIÓN OBTENIDO CON LOS	
	COAGULANTES TRABAJADOS EN EL AGUA PROBLEMA	83
3.5.1	Curvas de isoconcentración para 80% de remoción.....	83
3.5.2	Curvas de isoconcentración para 75% de remoción.....	85
3.5.3	Curvas de isoconcentración para 70% de remoción.....	86
3.5.4	Curvas de isoconcentración para 65% de remoción.....	87
3.6	PROPUESTA DE ECUACIONES	88
3.6.1	Cloruro férrico.	88
3.6.1.1	Propuesta para primera prueba de cloruro férrico.	89
3.6.1.2	Propuesta para segunda prueba de cloruro férrico.....	91
3.6.2	Sulfato de aluminio tipo A.	93
3.6.2.1	Propuesta para primera prueba de sulfato de aluminio tipo A.	93
3.6.2.2	Propuesta para segunda prueba de sulfato de aluminio tipo A.....	95
3.6.3	Sulfato de aluminio tipo B.	97
3.6.3.1	Propuesta para primera prueba de sulfato de aluminio tipo B.	97
3.6.3.2	Propuesta para segunda prueba de sulfato de aluminio tipo B.....	99
3.6.4	Análisis.....	101
4.	CONCLUSIONES.....	102
5.	RECOMENDACIONES.....	103
	REFERENCIAS	104

Lista de figuras

Figura 1. Curva de isorremoción.....	18
Figura 2. Grafica para encontrar tiempo de retención requerido para alcanzar remocion deseada.	19
Figura 3. Diagrama paragenético.....	24
Figura 4. Fuerzas que actúan sobre una partícula.....	25
Figura 5. Trayectorias de la sedimentación	26
Figura 6. Obtención de parámetros de diseño por el método de Talmadge y Fitch.	27
Figura 7. Indices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo.	35
Figura 8. Columna para el análisis de sedimentación.....	37
Figura 9. Ejemplo curvas de isoconcentración.....	38
Figura 10. Torre de sedimentación	39
Figura 11. Dosis bentonita Vs turbiedad	41
Figura 12. Dosis sulfato de aluminio tipo A Vs Turbiedad.....	43
Figura 13. Dosis sulfato de aluminio tipo B Vs Turbiedad.....	45
Figura 14. Dosis de cloruro férrico Vs Turbiedad.....	47
Figura 15. Dosis de polyfloc Vs Turbiedad.	48
Figura 16. Dosis de mackenfloc Vs Turbiedad.....	50
Figura 17. Torre de sedimentación.	52
Figura 18. Curvas de isoconcentración generadas por cloruro férrico.....	55
Figura 19. Curvas de isoconcentración para cloruro férrico.....	57
Figura 20. Curvas de isoconcentración generadas por cloruro férrico.....	60
Figura 21. Curvas de isoconcentración para cloruro férrico.....	62
Figura 22. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo A.....	65
Figura 23. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo A.....	67
Figura 24. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo A.....	70
Figura 25. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo A.....	72
Figura 26. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo B.....	75
Figura 27. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo B.....	77
Figura 28. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo B.....	80
Figura 29. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo B.....	82
Figura 30. Curvas de isoconcentración para 80% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.	84
Figura 31. Curvas de isoconcentración para 75% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.	85
Figura 32. Curvas de isoconcentración para 70% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.	86
Figura 33. Curvas de isoconcentración para 65% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.	87

Lista de tablas

Tabla 1. Dosis bentonita por 1L de agua problema.	40
Tabla 2 Propiedades del agua, prueba sulfato de aluminio tipo A	43
Tabla 3 test de jarras, dosis sulfato de aluminio tipo A.	43
Tabla 4. Propiedades del agua, prueba sulfato de aluminio tipo B	44
Tabla 5. Test de jarras, dosis sulfato de aluminio tipo B.	45
Tabla 6. Propiedades del agua, prueba cloruro férrico.	46
Tabla 7. Test de jarras, dosis cloruro férrico.	46
Tabla 8. Propiedades del agua, prueba polyfloc.	48
Tabla 9. Test de jarras, dosis polyfloc.	48
Tabla 10. Propiedades del agua, prueba mackenfloc.	49
Tabla 11. Test de jarras, dosis mackenfloc.	49
Tabla 12. Propiedades del agua primera prueba cloruro férrico	53
Tabla 13. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.	54
Tabla 14 % de remoción causadas por el cloruro férrico a diferentes tiempos y profundidades.	54
Tabla 15. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.	56
Tabla 16. Propiedades del agua problema para prueba de cloruro férrico.	58
Tabla 17. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.	58
Tabla 18. % de remoción causadas por el cloruro férrico a diferentes tiempos y profundidades.	59
Tabla 19. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.	61
Tabla 20. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo A.	63
Tabla 21. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.	63
Tabla 22. % de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo A a diferentes tiempos y profundidades.	64
Tabla 23. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.	66
Tabla 24. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo A.	68
Tabla 25. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.	68
Tabla 26. Porcentaje de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo A, a diferentes tiempos y profundidades.	69
Tabla 27. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.	71
Tabla 28. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo B.	73
Tabla 29. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.	73
Tabla 30. 31 % de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo B a diferentes tiempos y profundidades.	74
Tabla 32. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.	76
Tabla 33. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo B.	78
Tabla 34. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.	78

Tabla 35. % de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo B a diferentes tiempos y profundidades.....	79
Tabla 36. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.....	81
Tabla 37. Ecuaciones propuestas para cloruro férrico.....	89
Tabla 38. Características sedimentación utilizando cloruro férrico, bajo las condiciones expuestas.....	90
Tabla 39. Ecuaciones propuestas para cloruro férrico.....	91
Tabla 40. Características sedimentación utilizando cloruro férrico, bajo las condiciones expuestas.....	92
Tabla 41. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo A.....	93
Tabla 42. Características sedimentación utilizando alumbre tipo A, bajo las condiciones expuestas.....	94
Tabla 43. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo A.....	95
Tabla 44. Características sedimentación utilizando alumbre tipo A, bajo las condiciones expuestas.....	96
Tabla 45. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo B.....	97
Tabla 46. Características sedimentación utilizando alumbre tipo B, bajo las condiciones expuestas.....	98
Tabla 47. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo B.....	99
Tabla 48. Características sedimentación utilizando alumbre tipo B, bajo las condiciones expuestas.....	100

GLOSARIO

AGUA POTABLE: Se denomina agua potable al agua que ha recibido un tratamiento destinado a hacerla apta para el consumo humano, para lo cual se toman en cuenta todos sus usos domésticos. (CEPIS, 2016).

ALCALINIDAD: la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. (UPRM, 2016).

BENTONITA: es una arcilla de grano muy fino (coloidal) del tipo de montmorillonita que contiene bases y hierro.

CALIBRACIÓN: es la operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación. (Pérez, 2015)

CLORURO FÉRRICO: es un compuesto químico utilizado a escala industrial perteneciente al grupo de los haluros metálicos, cuya fórmula es FeCl_3 . Coagulante para tratamiento de aguas y efluentes, se comercializa habitualmente a granel.

COAGULANTE: químico que, al agregarse en el agua, vuelve fácil la adherencia entre partículas. (Academia Nacional de Ciencias, 2007)

CONDUCTIVIDAD: propiedad natural de los cuerpos que permiten el paso a través de sí del calor o la electricidad.

CURVAS DE ISOCONCENTRACIÓN: son curvas características del sistema de sedimentación tipo II, que definen el porcentaje de remoción y la tasa de sedimentación.

FLOC: conglomerado de partículas sólidas que se genera a través de los procesos de coagulación y floculación.

FLOCULACIÓN: es una operación muy importante cuando tenemos coloides presentes en el agua. Los coloides son partículas netamente cargadas, por lo que no sedimentan por sí mismas. Mediante la adición de coagulantes y floculantes, conseguimos desestabilizar estas cargas y posibilitamos que estas partículas sedimenten. (IMAGUA, 2013)

PARTÍCULAS DISCRETAS: aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. (Maldonado Yactayo, 2016)

PARTÍCULAS FLOCULENTAS: son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas como forma, tamaño y densidad, si cambian durante la caída. (Maldonado Yactayo, 2016)

PH: es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H^+) en una sustancia. (LENNTECH, 2016)

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP): es un conjunto de estructuras y sistemas de ingeniería en las que se trata el agua de manera que se vuelva apta para el consumo humano. (AGUASISTEC, 2016)

RESISTIVIDAD: resistencia proporcional de un material conductor según su longitud y anchura.

SALINIDAD: es el contenido de sal disuelta en un cuerpo de agua.

SEDIMENTACIÓN: Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. (Maldonado Yactayo, 2016)

SEDIMENTADOR: estructura que remueve los residuos sólidos sedimentables y material flotante, cuya finalidad es disminuir la concentración de sólidos suspendidos. (AGUASISTEC, 2016)

SÓLIDOS DISUELTOS: son los sólidos filtrables; es decir, los que pasan en el proceso de filtración. Son sales y sólidos en estado coloidal. Estas partículas son menores a un micrómetro. Es el residuo que queda después de secar la muestra a 180°C. (CEPIS, 2016)

SÓLIDOS SUSPENDIDOS: son los que están presentes en la muestra, excepto los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos por filtración en un laboratorio de análisis. (CEPIS, 2016)

SÓLIDOS TOTALES: son los residuos que quedan después de secar la muestra. El residuo total de agua se determina a 103-105°C. (CEPIS, 2016)

SÓLIDOS VOLÁTILES Y FIJOS: los sólidos volátiles son aquellos que se evaporan durante la calcinación a 550°C en mufla (materia orgánica) y el residuo que queda son los sólidos fijos (materia orgánica). (CEPIS, 2016)

SULFATO DE ALUMINIO: El sulfato de aluminio es un compuesto químico inorgánico; una sal de fórmula $Al_2(SO_4)_3$, es sólido o líquido, dependiendo de la materia prima puede tener color café o blanco. Es ampliamente usada en la industria, comúnmente como floculante en la purificación de agua potable.

TORRE DE SEDIMENTACIÓN: estructura que permite los ensayos de laboratorio de la sedimentación tipo II.

TURBIDÍMETRO: es un medidor portátil con una gran pantalla que cumple todas las exigencias para medir la turbidez in situ. (PCE, 2016)

TURBIEDAD: la falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión. (Beltran, 2011)

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta de ecuaciones, generadas a partir de la realización de pruebas en laboratorio, que comprenden el estudio de un agua problema clasificada entre un rango de turbiedad (25-30) NTU. Para tal fin se realizaron pruebas que determinaran la dosificación de bentonita (agente que permite subir el nivel de turbiedad del agua), dosificación del coagulante a utilizar para las pruebas de columna de sedimentación, y pruebas en la torre que permitieran determinar el comportamiento de las partículas floculentas, así logrando su posterior análisis y generación de ecuaciones.

Los coagulantes utilizados en las pruebas hechas en la torre de sedimentación fueron: cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B. Las pruebas consistían en llenar la torre, logrando una altura de lámina de agua de 175 cm, este llenado se completaba con una dosis de coagulante, seguidamente se ponía aire a presión para generar mezcla rápida y lenta, las cuales estaban estipuladas de 1 minuto y 25 minutos respectivamente. Una vez terminadas las mezclas se tomaban los datos arrojados de turbiedad, para diferentes rangos de tiempo comprendidos entre 0 y 120 minutos y para diferentes rangos de profundidad, entre 0 y 1.75 metros. Luego de obtener las turbiedades a diferentes tiempos y profundidades, estos fueron pasados a % de remoción, teniendo en cuenta la turbiedad inicial de la prueba. Fueron graficados, analizados y finalmente se generaron ecuaciones para cada una de las curvas de isoconcentración, evaluada por los tres coagulantes, para un rango de 80% y 30% de remoción.

El comportamiento en la sedimentación de partículas floculentas es definido mediante ecuaciones polinómicas de grado 2; ecuaciones que cumplen su aplicación en aguas problema de características iguales o similares a las expuestas en este proyecto. Estas ecuaciones permiten evaluar el tiempo de remoción y la profundidad de sedimentación, teniendo en cuenta el tipo de coagulante y el porcentaje de remoción deseado.

INTRODUCCIÓN

“Una vez coagulada y floculada el agua, el problema consiste en separar los sólidos del líquido o sea las partículas floculentas del agua, donde están suspendidas” (Perez, 2016). Uno de los métodos a utilizar es la sedimentación, la cual realiza la separación de las partículas más densas que el agua y, que tengan una velocidad de sedimentación tal, que permita que lleguen al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable.

Ante la actual necesidad de recuperación y tratamiento de agua, se ha visto la obligación de explorar nuevos campos para que partículas de baja concentración, que varían de tamaño y superficie puedan ser sedimentadas de forma rápida, para lo cual se utiliza el sedimentador tipo II (floculentas), que permite por medio de curvas de isoconcentración la calibración del sistema. Pero estas carecen de precisión, ya que estas curvas dependen mucho del criterio del proyectista; por tanto, surge la idea de la calibración del sistema con diferentes tipos de coagulantes, como: cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B. Con el fin de proponer un sistema de ecuaciones que permita el cálculo preciso del sistema, y nos arroje resultados consistentes.

La presente investigación realiza la descripción de las características del sedimentador tipo II, los estudios existentes, el funcionamiento de las curvas de isoconcentración, así como las condiciones necesarias para la creación de las posibles ecuaciones que permitan la calibración del sistema, sumado a factores que intervengan en este proceso como las pruebas a realizar con cada uno de los coagulantes, y actividades productivas que generen procesos positivos en la investigación. De igual forma se realiza los estudios de pre factibilidad que son requeridos para el posicionamiento de esta nueva alternativa de calibración; esto con el fin de identificar los riesgos que puedan presentarse a largo de la operación. La información recopilada en cada uno de los estudios, seguido de su análisis, determinan las características del sistema, lo cual permite determinar las ecuaciones más precisas y seguras para su posterior cálculo y posicionamiento, en la calibración, mitigando los posibles riesgos que se hayan presentado anteriormente por la inexactitud de las curvas de isoconcentración.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La materia orgánica y los flóculos formados por los coagulantes químicos o los crecimientos de las zoogreas, tienden a aglomerarse (fenómeno llamado coalescencia); se forman cúmulos de diferente tamaño, forma y peso. Normalmente, estos se sedimentan con mayor rapidez que las partículas o flóculos que los constituyen. Los flóculos se juntan cuando chocan entre sí. La sedimentación floculable se efectúa en sedimentadores primarios para tratamientos de aguas residuales y en la sedimentación con coagulantes químicos para tratamientos de aguas potables y residuales. (Zatarain del Castillo, 1988)

En este caso no es posible un análisis matemático, debido al contacto aleatorio entre las partículas. Por lo tanto, para obtener parámetros de diseño (carga superficial, tiempo de retención, porcentaje de remoción) es necesario recurrir a ensayos de laboratorio. (Zatarain del Castillo, 1988)

Los ensayos de laboratorio se realizan poniendo la muestra de agua o la suspensión que se desea sedimentar en una columna de sedimentación cilíndrica que puede ser de vidrio o de plástico de unos 3 metros de alto por 15 cm de diámetro, provista de salidas igualmente distanciadas unos 50cm entre sí con el fin de tomar muestras de cada salida cada cierto intervalo de tiempo: en cada muestra tomada se miden los sólidos suspendidos o en su defecto la turbiedad; al iniciar el ensayo, es decir en tiempo cero, la muestra debe estar completamente homogénea. La prueba representativa debe llevarse a cabo bajo condiciones de reposo y la temperatura no debe variar más de 1°C a través de la altura de la columna a fin de evitar corrientes convectivas. (Zatarain del Castillo, 1988)

Los cálculos a realizar son:

$$\%Remocion = \left(\frac{Co - C}{Co} \right) * 100 \quad (1)$$

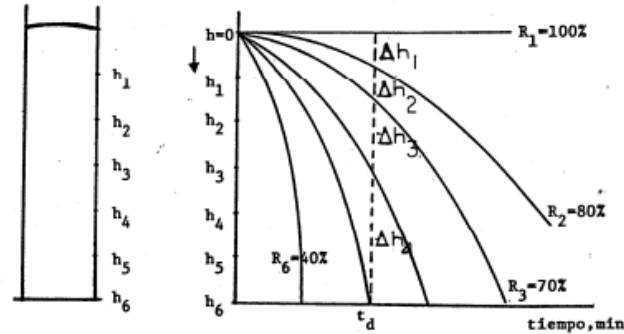
Dónde: Co= sólidos suspendidos o turbiedad inicial (t=0)

C= sólidos suspendidos o turbiedad para un tiempo t.

Con los datos de % de remoción, profundidad y tiempo, se grafica en papel milimétrico profundidad contra tiempo, y se unen con una línea los puntos de igual

remoción; de esta forma se obtienen las llamadas “curvas de isorremoción”. (Zatarain del Castillo, 1988)

Figura 1. Curva de isorremoción.



Fuente: (Zatarain del Castillo, 1988)

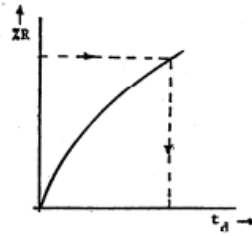
La altura del agua en la columna debe corresponder a la profundidad que va a tener el tanque real. (Zatarain del Castillo, 1988)

Se selecciona un tiempo de retención t_d y se localiza en la gráfica: para que una partícula sea removida se requiere una velocidad de sedimentación igual a h/t_d ; en esta forma la remoción total será: (Zatarain del Castillo, 1988)

$$R = \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) \left(\frac{\Delta h_1}{h_6} \right) + \left(\frac{r_2 + r_3}{2} \right) \left(\frac{\Delta h_2}{h_6} \right) + \left(\frac{r_3 + r_4}{2} \right) \left(\frac{\Delta h_3}{h_6} \right) + \dots \quad (2)$$

Con diferentes tiempos de retención se obtienen diferentes remociones y se puede construir una gráfica de % de remoción contra tiempo de retención. (Zatarain del Castillo, 1988).

Figura 2. Grafica para encontrar tiempo de retención requerido para alcanzar remocion deseada.



Fuente: (Zatarain del Castillo, 1988)

Con esta grafica se puede encontrar el tiempo de retención requerido para alcanzar la remoción deseada.

Para la realización de las pruebas en laboratorio se utilizó un prototipo diseñado como propuesta de grado por los estudiantes Irne Alejandro Manrique y Jhon Marcos Gómez, de la Universidad Católica de Colombia, para el cual se definió una altura total de 200 cm, para simular la altura promedio de un sedimentado convencional, un borde libre de 10 cm, un diámetro de 20 cm en el cuerpo de la estructura. (Manrique Alejandro, Gomez Jhon, 2016)

La estructura fue dividida en 4 elementos de igual altura y diámetro unidos por bridas. Esta decisión se obtuvo al analizar algunos factores como:

- **La esbeltez:** debido a que la relación sección transversal-altura hace que la estructura sea inestable o que requiera bastante refuerzo en la base. Las bridas ayudan a distribuir de mejor manera los esfuerzos generados por las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas. (Manrique Alejandro, Gomez Jhon, 2016)
- **Mantenimiento:** Puesto que va ser una estructura que en su fondo se depositaran solidos debido a las prácticas de laboratorio, se desarticulara por medio de las bridas para facilitar la limpieza de la base y en general del prototipo. (Manrique Alejandro, Gomez Jhon, 2016)
- **Futuras averías:** La estructura puede fallar debido a la falta de mantenimiento y al cambio invariable en los esfuerzos a la que está sometida al largo de su vida útil, por lo que, si se llega a dañar una zona que no comprometa toda la estructura, puede ser reemplazada sin necesidad de gastar dinero. (Manrique Alejandro, Gomez Jhon, 2016)

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La sedimentación tipo II es especial para el tratamiento de partículas floculentas con concentraciones bajas. La sedimentación floculable se efectúa en sedimentadores primarios para el tratamiento de aguas residuales y se realiza la sedimentación con coagulantes químicos para el tratamiento de aguas y aguas residuales.

Aun no se ha desarrollado matemáticamente una ecuación que pueda agrupar la explicación de la sedimentación tipo II. El método existente consiste en graficar profundidad contra tiempo, y se unen con una línea los puntos de igual remoción de turbiedad (NTU); de esta forma se obtienen las llamadas “curvas de isoconcentración”. Grafica que resulta de un proceso manual, ya que al día de hoy el análisis matemático no es posible.

Aunque los resultados de este proceso sean precisos, el recurso expuesto puede ser mejorado, optimizando variables de costo y tiempo. Por tanto, es importante generar ecuaciones que se ajusten a las curvas de isoconcentración permitiendo manipular cada una de las variables involucradas en el proceso, como: porcentaje de remoción y carga superficial. Para ello con la ayuda de la torre de sedimentación se plantea la calibración de dichas curvas.

Bajo estas condiciones se propone mejorar el método de cálculo empleado para las estructuras de sedimentación tipo II, generando ecuaciones que expliquen el comportamiento de las curvas características del sistema.

En virtud de lo anterior, se identifica la siguiente problemática a ejecutar con el presente Proyecto de Grado:

“El método de cálculo existente para sedimentadores tipo II no presenta un sistema de ecuaciones que explique con exactitud las características uniformes en las curvas de isoconcentración”.

Teniendo en cuenta lo anteriormente contextualizado se formula la siguiente pregunta:

¿Es posible proponer ecuaciones como resultado de la calibración de las curvas de isoconcentración en sedimentadores tipo II, para diferentes coagulantes?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

Proponer ecuaciones matemáticas de isoconcentración para sedimentación tipo II, con diferentes coagulantes.

1.3.2 Específicos

- ✓ Realizar el montaje experimental en laboratorio, con la preparación del agua problema y la torre de sedimentación, para el desarrollo del proyecto.
- ✓ Generar el comportamiento de las curvas de isoconcentración a partir de los datos de remoción, profundidad y tiempo, en la sedimentación de las partículas floculentas.
- ✓ Proponer ecuaciones que representen las curvas de isoconcentración, ajustadas al tipo de coagulante y turbiedad presentada en el agua problema.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Debido a que el sistema de calibración de las curvas de isoconcentración existente requiere de tiempo y se limita a la precisión del dibujante, se ve la necesidad de realizar la descripción de los estudios que permiten obtener la caracterización matemática de las curvas del sistema para tipos específicos de agua y coagulante utilizados en plantas de tratamiento de agua potable, la identificación de los riesgos y la factibilidad de la creación de las ecuaciones que permitirán la precisión de la calibración del sistema, este trabajo de investigación permitirá establecer las herramientas básicas de los estudios necesarios que se deben desarrollar en la ingeniería específicamente con el tema de posicionamiento de las ecuaciones, y el mejoramiento del sistema.

1.5 MARCO DE REFERENCIA

En este apartado se encontrará el contenido referente al marco teórico y conceptual, donde se aclararán las teorías desarrolladas en este proyecto y se obtendrá una mayor claridad de conceptos fundamentales.

1.5.1 Marco teórico

1.5.1.1 Sedimentación.

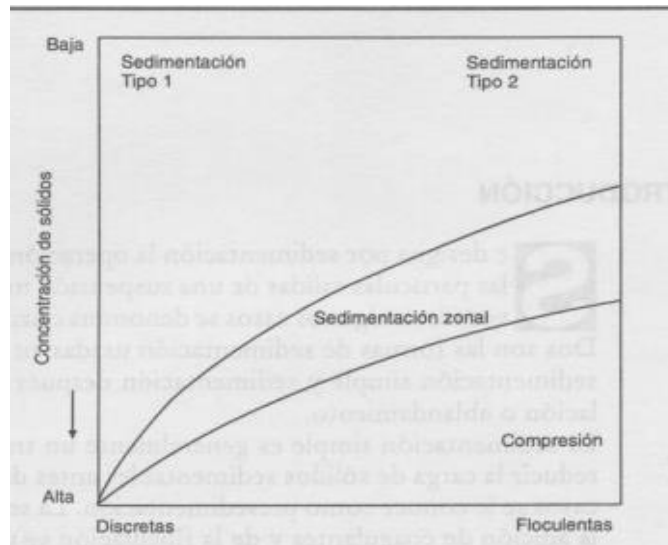
“Por sedimentación se denomina el proceso mediante el cual se asientan los sólidos suspendidos en un fluido, bajo la acción de la gravedad”. (Perez, 1981)

“El proceso de sedimentación en una planta de tratamiento de agua potable convencional, es en general el principal responsable en remoción de partículas causantes de turbiedad y color. El grado de remoción exigido a esta etapa, depende fuertemente de la eficiencia del proceso posterior de filtración.” (PIGNATTA, 1998)

La sedimentación es una operación que se lleva a cabo en las plantas de tratamiento de agua potable y residual, por medio de asentamiento gravitacional de las partículas en suspensión. Esta operación se puede inducir por procesos previos de coagulación, floculación o generación de biomasa. (Zatarain del Castillo, 1988)

La sedimentación ocurre de maneras diferentes, dependiendo de su concentración y su grado de floculación, en el agua se pueden encontrar partículas discretas, floculentas y precipitantes. La existencia de diferentes tipos de partículas en concentraciones distintas hace que sea necesario considerar disímiles tipos de sedimentación, En la ilustración 3 se describe los diferentes tipos de sedimentación, siendo la sedimentación zonal la misma sedimentación tipo III y la compresión, la sedimentación tipo IV. (Rojas, 1999)

Figura 3. Diagrama paragenético.



Fuente: (Rojas, 1999)

Existen cuatro tipos de sedimentación:

Sedimentación de Tipo 1 o de Partículas Discretas; existe baja concentración de sólidos, las partículas sedimentan como entidades individuales y no interaccionan entre ellas. (IMAGUA, 2013)

Sedimentación de Tipo 2 o Floculenta; hay una baja concentración de sólidos en suspensión en el agua, pero las partículas interaccionan entre ellas y forman flóculos (grupos de partículas adheridas entre sí). (IMAGUA, 2013)

Sedimentación de Tipo 3 o Retardada o Zonal; este tipo de sedimentación es característica de suspensiones con una elevada concentración de sólidos. Las partículas se adhieren entre sí y la sedimentación se produce en bloque o pistón. Las interacciones entre las partículas provocan una disminución de la velocidad de sedimentación de cada una de ellas. Se caracteriza por que hay una capa límite bien definida entre la masa sedimentable y el líquido sobrenadante. (IMAGUA, 2013)

Sedimentación de Tipo 4 o de Compresión; la sedimentación por compresión es la que típicamente se da en el fondo de los clarificadores en un proceso de lodos activos. La concentración de sólidos es tan grande que se ha creado una estructura, y la única manera de progresar en la sedimentación es mediante la compresión

ejercida por el peso de las nuevas partículas que se van depositando encima de las ya existentes. (IMAGUA, 2013)

➤ **Sedimentación tipo I.**

Una partícula discreta es aquella que, durante la sedimentación, no altera su tamaño, forma o peso. (Zatarain del Castillo, 1988)

Figura 4. Fuerzas que actúan sobre una partícula



Fuente: (Zatarain del Castillo, 1988)

La fuerza impulsora es igual al peso efectivo de la partícula, y su cálculo es el siguiente:

$$Fi = \rho_s * V * g - \rho_1 * v * g \quad (3)$$

$$Fi = V * g(\rho_s - \rho_1) \quad (4)$$

En donde Fi= Fuerza impulsora

g=aceleración debida a la gravedad

V= volumen de la partícula

Ps=masa- densidad de la partícula

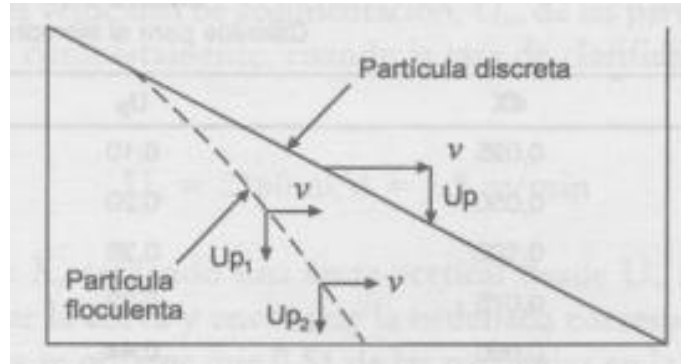
P1= masa- densidad del fluido

➤ **Sedimentación tipo II.**

En este tipo de sedimentación se deben tener en cuenta las propiedades floculentas de la suspensión además de las características de sedimentación de las partículas. (Rojas, 1999)

El viaje de las partículas en el agua tiene cambios de velocidad de sedimentación durante su asentamiento debido a la aglomeración. Este tipo de sedimentación, es conocido como sedimentación floculenta y es considerado el tipo de sedimentación más común en la purificación y tratamiento de aguas. (Rojas, 1999)

Figura 5. Trayectorias de la sedimentación



Fuente: (Rojas, 1999)

Los cálculos que se realizan son los siguientes:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{C_0 - C}{C_0} * 100 \quad (1)$$

Donde:

C_0 = Sólidos suspendidos o turbiedad inicial ($t=0$)

C = Sólidos suspendidos o turbiedad para un tiempo t

Las partículas que se remueven en una planta de tratamiento de agua potable son sólidos inorgánicos y orgánicos. Aquellos factores que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma y densidad. (VEGA Guzman, y otros, 2006)

Para el cálculo de la tasa de sedimentación se hace uso del tiempo y la altura de la siguiente forma:

$$V_s = C_s = \frac{h}{t} \quad (5)$$

Donde:

$V_s = C_s$ = Tasa de sedimentación

h = Altura en (m)

t = tiempo en (min)

Se selecciona un tiempo de retención t_d y se localiza en la gráfica; para que una partícula sea removida se requiere una velocidad de sedimentación igual a h_0/t_d : las partículas con velocidades menores a ésta serán removidas parcialmente en proporción a la relación v_s/v_0 , siendo $v_s = \Delta h/t_d$ y $v_0 = h_0/t_d$; en esta forma la remoción total será:

$$R = \frac{r_1+r_2}{2} * \frac{\Delta h_1}{h_0} + \frac{r_2+r_3}{2} * \frac{\Delta h_2}{h_0} + \frac{r_3+r_4}{2} * \frac{\Delta h_3}{h_0} + \dots (2)$$

➤ Sedimentación tipo III.

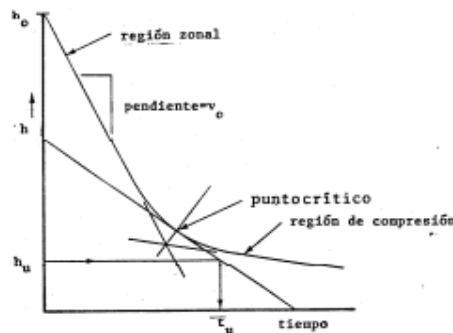
Tiene lugar en suspensiones de concentración intermedia, en las que las fuerzas interparticulares son suficientes en la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer entre sí en posiciones fijas y la masa de las mismas se deposita como una unidad. (Zatarain del Castillo, 1988)

➤ Sedimentación tipo IV.

Tiene lugar cuando las partículas una concentración que produce una estructura y sólo puede producirse un nuevo asentamiento por compresión. (Zatarain del Castillo, 1988)

Para el diseño, hay una concentración crítica del lodo que controla la capacidad de su manipulación en el tanque. Este punto crítico se encuentra en una gráfica prolongando la primera y tercera porción de la curva hasta su intersección; luego se traza una bisectriz al ángulo que se forma en la intersección; esta bisectriz corta a la curva en el punto crítico; en este punto se traza una tangente a la curva; esta tangente nos da la velocidad promedio de sedimentación zonal o velocidad de la interfase. (Zatarain del Castillo, 1988)

Figura 6. Obtención de parámetros de diseño por el método de Talmadge y Fitch.



Fuente: (Zatarain del Castillo, 1988)

$$hu = \frac{ho * Co}{Cu} \quad (6)$$

Donde ho= Altura inicial en el recipiente (profundidad efectiva en el tanque).

Cu= Concentración crítica de lodos.

hu= Altura de la interfase cuando la concentración de lodos sea Cu.

Co= Concentración inicial.

A= Área superficial

Una vez calculado el valor de hu se localiza en la gráfica el tiempo de retención (tu).

$$\frac{Q}{A} = \frac{ho}{tu} \quad (7)$$

El área requerida del tanque es:

$$At = 1.5 * Q * \frac{tu}{ho} \quad (8)$$

Donde Q= Q'+R

Q'= Flujo proveniente del tanque de aireación que precede al tanque de sedimentación.

R=Flujo de lodo reciclado.

1.5=Es un factor de escalamiento.

Para determinar el área requerida para la clarificación Ac:

$$Ac = 2.0 * \frac{Q'}{v_o} \quad (9)$$

Para los casos de diámetro de partículas comprendidas entre 0,85 y 1,0 mm y especialmente números de Reynolds de 1 a 1.000, se presenta flujo de transición para el cual los valores de coeficiente de descarga (CD) son variables y su determinación puede realizarse a través de cualquiera de las ecuaciones indicadas a continuación. (Maldonado Yactayo, 2016)

$$\text{Ecuación Rich} \quad CD = \frac{18,5}{Re^{0,60}} \quad (10)$$

$$\text{Ecuación Hatch} \quad CD = \frac{14}{Re^{0,50}} \quad (11)$$

$$\text{Ecuación de Allen} \quad CD = \frac{12,65}{Re^{0,50}} \quad (12)$$

$$\text{Ecuación de Fair-Geyen-Okun} \quad CD = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad (13)$$

$$\text{Ecuación de Schiller-Newman} \quad CD = \frac{12}{Re} * (1 + 0,14Re^{0,687}) \quad (14)$$

$$\text{Ecuación de Goldstein} \quad CD = \frac{12}{Re} + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1280}Re^2 + \frac{71}{20480}Re^3 \quad (15)$$

Si se desconoce cómo se comporta la sedimentación de una determinada partícula (zona laminar, turbulenta o en transición), el cálculo de la velocidad de sedimentación debe hacerse por tanteos. (Maldonado Yactayo, 2016)

La sedimentación es un proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en su seno en suspensión, son removidas por la acción de la gravedad. Pero aquellas partículas clasificadas como discretas y floculentas encontradas a diferentes concentraciones, necesita de un tratamiento especial, para ello es necesario implementar cada uno de estos procesos de sedimentación. (Farrás, 2015)

1.5.2 Marco conceptual

1.5.2.1 El agua.

El agua es la sustancia que más abunda en el planeta tierra, además es la única que se puede encontrar en diferentes estados; líquido sólido y gaseoso. El 97% de agua existente en la tierra se encuentra en los océanos, pero esto se trata de agua salada, la cual es muy costosa y compleja de potabilizar. El resto es agua dulce, pero no toda está disponible: gran parte permanece siempre helada, formando los casquetes polares y los glaciales. (FAO)

El ciclo del agua inicia con la lluvia. Cerca del 20% de esta penetra en el subsuelo, el resto queda filtrada en el suelo y corre hacia el mar, formando arroyos, lagos y ríos. Una parte del agua es evaporada justo cuando la lluvia termina y cuando la humedad disminuye. (Etienne, 2009)

➤ **Turbiedad en el agua.**

La turbidez se define por oscurecer el agua o en otras palabras disminuye la claridad natural o transparencia. Esta turbiedad es generada por materia en suspensión, tales como: arcilla, cieno o materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos. Los parámetros de dispersión y absorción de la luz en el agua, definen los resultados de turbidez. Y esto es controlado por el tipo y concentración de la materia que se encuentra suspendida. (Martha Garcia y otros, 2016)

➤ **Materia orgánica.**

Se dice que cerca del 75% de los sólidos que se encuentran suspendidos y 40% de los sólidos filtrables en el agua son de naturaleza orgánica. Siendo estos sólidos generalmente de origen animal y vegetal, aunque también generado por actividades humanas. (UDLAP, 2017)

1.5.2.2 Coagulación

Estudios realizados han permitido identificar que las impurezas que posee el agua pueden estar en los siguientes estados: en suspensión, disueltas suspensiones concentradas: en particular vegetales, restos de hojas, vegetales (macroscópicos), sílice, etcétera, que pueden flotar o sedimentarse fácilmente cuando el agua está en reposo, suspensiones finas: turbidez, bacterias, plancton, etcétera, coloidales: dureza, en parte (sales de calcio y magnesio); fierro y manganeso no oxidados, etcétera. (CEPIS, 2002)

La coagulación tiene como finalidad desestabilizar y aglomerar las partículas que se encuentran disueltas, así adquirir mayor densidad y poder ser removidas por la decantación (sedimentación) y la filtración. Los aglomerados gelatinosos se agrupan y producen los flóculos, cuyo proceso se conoce como floculación. (CEPIS, 2002)

➤ **Sustancias químicas utilizadas en la coagulación.**

Existen ciertas sustancias químicas que se utilizan en la coagulación y se pueden clasificar en tres categorías:

Coagulantes: son compuestos de aluminio o de hierro que por lo general producen hidróxidos de textura gelatinosa no solubles y absorber impurezas. (CEPIS, 2002)

Alcalinizantes: cal viva (óxido de calcio), hidróxido de calcio, hidróxido de sodio (soda cáustica), carbonato de sodio (carbonato sódico), que pueden proporcionar la alcalinidad necesaria para la coagulación. (CEPIS, 2002)

Coadyuvantes de la coagulación: son compuestos como arcilla, sílice activada, polielectrolitos, entre otros. Estos compuestos pueden convertir las partículas en más densas y hacer que los flóculos sean de mayor firmeza. (CEPIS, 2002)

➤ **Propiedades.**

La cantidad de coagulante a utilizar que en su mayoría y preferencia son los de tipo aluminio y hierro, depende de la turbidez y el color que se va a remover y también la concentración bacteriológica. Como todas las aguas no son iguales, y poseen

características y concentraciones bacteriológicas diferentes se recomienda hacer uso de la prueba de jarras. (CEPIS, 2002)

Existen dos tipos de mezcla las cuales son: la rápida, donde el tiempo deberá ser instantáneo y en este momento el coagulante se dispersa de tal modo que toda el agua quede enterada de la presencia de este agente. Luego de esta mezcla, aparece la mezcla lenta, que permite la formación de flóculos, en esta mezcla se aglomera el material causando un aumento en su densidad y provocando mayor rapidez en la decantación. (CEPIS, 2002)

1.6 METODOLOGÍA

Para el proyecto se hizo uso del laboratorio de calidad del agua, ubicado en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia, que permitió como primer paso, la preparación del agua problema; y con la ayuda de la torre de sedimentación, se determinó la sedimentación presente en las partículas floculentas que se presentan en el sistema. A continuación, se determinó la turbiedad del agua problema, presentada en unidades nefelométricas de turbiedad (NTU), para diferentes tiempos y profundidades.

A partir de los datos obtenidos en laboratorio, se generaron curvas características del sistema, graficando profundidad contra tiempo, que mediante un proceso analítico se calibraron. Finalmente se propuso ecuaciones que definen las curvas que más se ajustan al tipo de coagulante y turbiedad presentadas en el agua problema.

Etapas 1: Preparación del agua problema (Dosificación de bentonita).

Siendo la bentonita una arcilla y al mismo tiempo agente que permite aumentar el grado de turbiedad del agua. Se hicieron pruebas para determinar la dosis de bentonita necesaria, que disuelta en un litro de agua podía alcanzar un rango de (25-30) UNT (unidades nefelométricas de turbiedad). Así que se tomaron varias dosis de bentonita hasta encontrar la óptima de trabajo. Aunque luego se observó que las características del agua cambian día tras día, para las pruebas siguientes se decidió partir de la base obtenida en este paso, medir y completar, siempre buscando el rango de turbiedad óptimo de trabajo que como se mencionó anteriormente estaba entre 25 y 30 UNT. El proceso consistía en pesar diferentes dosis en la balanza, luego diluir en un balón volumétrico 1 litro de agua y la bentonita pesada. Una vez diluida la solución, se procedía a tomar lectura de la turbiedad haciendo uso del turbidímetro, finalmente se tomaba nota del resultado.

Etapas 2: Dosificación (Test de jarras).

Encontrada la dosis de bentonita óptima para una turbiedad entre (25-30) UNT, se procedió a realizar el test de jarras, que permitiría encontrar la dosis ideal de coagulante, que se usaría más adelante en la prueba de torre de sedimentación. Este test de jarras se realizó con diferentes tipos de coagulantes, los cuales fueron: Sulfato de aluminio tipo A, Sulfato de Aluminio tipo B, Cloruro Férrico, Polyfloc y Mackenfloc. Para los cuales se realizaron 3 pruebas por cada uno y se escogió la prueba que arrojó valores óptimos. El proceso consistía en llenar 6 jarras de 800 ml con agua problema, al mismo tiempo se tomaba la alcalinidad del agua y se

estipulaba la dosis de coagulante a utilizar, se disolvía 0.1 g de coagulante en 1 litro de agua destilada y se separaban las 6 dosis para cada una de las jarras. Luego se adicionaba el coagulante que le correspondía a cada jarra, se ponía la mezcla rápida de 1 minuto y seguida la mezcla lenta de 25 minutos. Una vez terminadas las dos mezclas, se dejaba reposar por 10 minutos y se procedía a tomar lecturas de turbiedad.

Etapa 3: Sedimentación tipo II en torre de sedimentación

Las pruebas de sedimentación para partículas floculentas se llevó a cabo con tres coagulantes (cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B), la herramienta que sirvió de apoyo para estas pruebas fue la torre de sedimentación. Las pruebas consistían en determinar la turbiedad a diferentes profundidades y a diferentes rangos de tiempo de remoción. Para esto se llenaba la torre con agua problema, adicionando la dosis de bentonita disuelta, que permitía tener una turbiedad en un rango de (25-30) UNT. Luego se procedía a verter la dosis de coagulante y poner aire a presión, que entraba por la parte baja de la torre, este aire permitía simular la mezcla rápida y lenta. Se utilizó 30 psi para la rápida y 5 psi para la lenta, con una duración de 1 y 25 minutos respectivamente. Una vez terminada las dos mezclas se procedía a tomar muestras a diferentes profundidades por medio de válvulas que permitían el acceso al agua problema. Repitiendo este proceso de toma de muestras para diferentes rangos de tiempo durante 2 horas. Este proceso se realizó para cada uno de los coagulantes mencionados, haciendo dos pruebas por cada uno, para su posterior análisis y comparación.

Etapa 4: Generación de ecuaciones

Una vez terminada las prácticas de laboratorio se procedió a pasar todos los datos de turbiedad tomados a porcentaje de remoción, teniendo en cuenta la turbiedad inicial para cada una de las pruebas. Estos porcentajes de remoción para diferentes tiempos y profundidades fueron graficados en AutoCAD, generando 6 graficas en total, esto por los 3 coagulantes utilizados y las dos veces que se hizo por coagulante. Generando las llamadas curvas de isoconcentración para cada porcentaje de remoción tomado entre un rango de (80-30) porciento de remoción. Estas graficas se hicieron con el objetivo de poder leer las coordenadas cartesianas, en el eje x, el tiempo y en el eje y, la profundidad. Obtenidas las coordenadas de cada una de las curvas de isoconcentración, se graficaron nuevamente, pero esta vez utilizando la herramienta de EXCEL. Esto con el objetivo de generar curvas de tendencia que mejor se ajustaran a las curvas y finalmente crear curvas polinómicas de grado 2. Curvas que definieran de la mejor manera el comportamiento que tenían las partículas floculentas en la sedimentación en agua problema evaluada.

2. ESTADO DEL ARTE DE LA SEDIMENTACIÓN TIPO II

2.1 GENERALIDADES

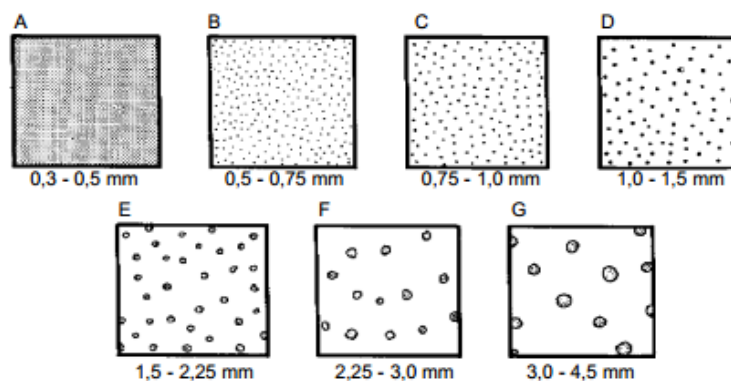
Estudios realizados a través del tiempo han determinado que existen cuatro tipos de sedimentación. Siendo la sedimentación tipo II la trabajada en el presente proyecto y aquella que estudia la caída de las partículas floculentas.

En una planta de tratamiento de agua potable se remueven tanto sólidos orgánicos como inorgánicos. El tamaño, forma y densidad, son aquellos factores que afectan directamente en la velocidad con la que las partículas sedimentan.

Se determinó que las partículas en suspensión de agua tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua en 85 a 95% y turbiedad y/o color con densidades variables entre 1.002 cuando predomina el color y el 1.03 cuando predomina la turbiedad. En procesos de ablandamiento los flóculos tienen densidades cercanas a 1.20. (Maldonado Yactayo, 2016)

Willcomb clasificó los flóculos por su tamaño, definiendo un diámetro variable desde menos de 0.001mm hasta más de 5mm, esto dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación.

Figura 7. Indices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo.



Fuente: (Maldonado Yactayo, 2016)

2.2 MÉTODO SEDIMENTACIÓN TIPO II

Siendo el tipo de sedimentación más común en purificación y tratamiento de aguas, la sedimentación tipo II es la más compleja de estudiar debido a su comportamiento, según Jairo Romero “Dos partículas que se aglomeran durante su asentamiento pierden su velocidad individual de sedimentación y, por consiguiente, se sedimentan con otra velocidad característica de la nueva partícula formada, generalmente mayor que las velocidades originales”. (Rojas, 1999)

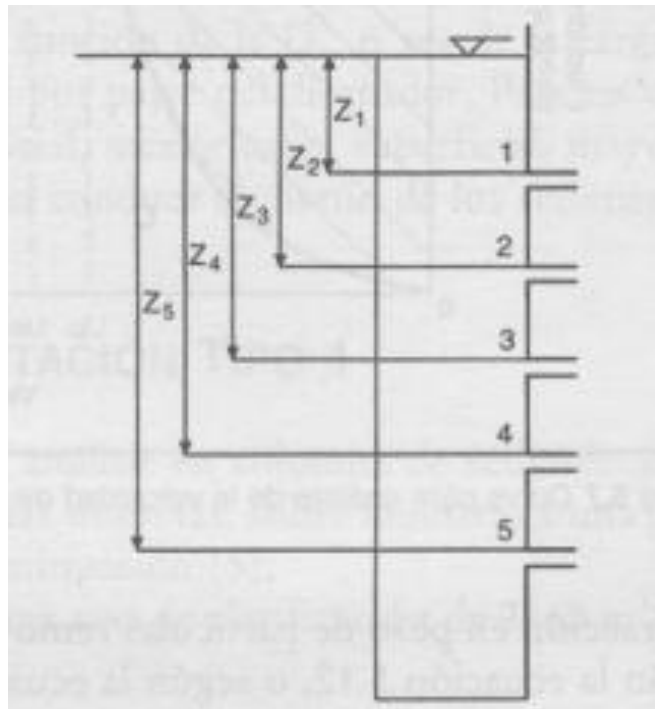
Desde los años 1904 el ingeniero experto en el sector hidráulico Hazen proponía subdividir horizontalmente los tanques de sedimentación para aumentar la capacidad de tratamiento. Unos años más tarde, precisamente en 1946 Camp presento el diseño de sedimentadores con bandejas horizontales. Sin embargo, la propuesta de Camp nunca se hizo popular debido a dificultades en la limpieza y otras no conocidas. (Rojas, 1999)

En 1968, Culp, Hansen y Richardson, observaron que la profundidad incide drásticamente en el tiempo de caída de las partículas, concluyendo que aquellos tanques cuya profundidad era muy baja ocasionaba tiempos muy cortos de sedimentación. Así que idearon los llamados sedimentadores de tubos de diámetro pequeño, y así impulsaron los hoy popularmente llamados sedimentadores de alta tasa. (Rojas, 1999)

Debido al comportamiento expuesto anteriormente, los estudios realizados permiten realizar la siguiente metodología para desarrollar la sedimentación tipo II.

La suspensión diluida de partículas floculentas puede determinarse a partir de un análisis con columnas de sedimentación. El proceso consiste en llenar de agua problema una columna como la mostrada en la figura 8, y dejar sedimentar durante un tiempo determinado sin ningún tipo de agitación.

Figura 8. Columna para el análisis de sedimentación.



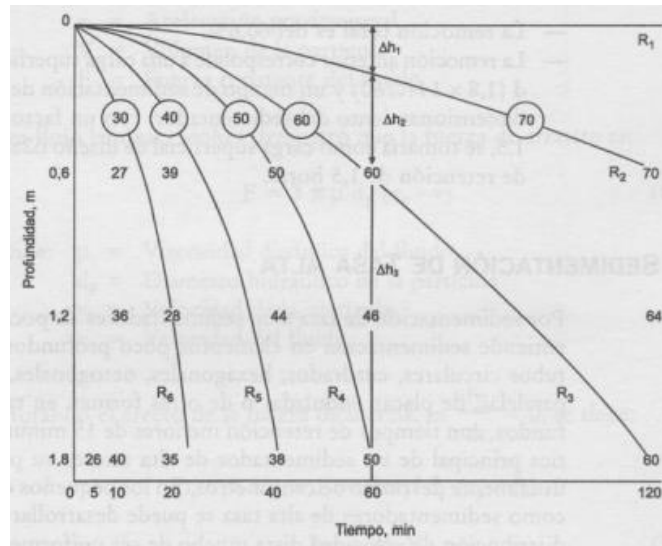
Fuente: (Rojas, 1999)

Una vez terminado el tiempo estipulado para el reposo, se determina la concentración de partículas tomadas a diferentes profundidades y a diferentes intervalos de tiempos, obteniendo con esto el % de remoción con respecto al estado inicial del agua.

Teniendo estos valores de % de remoción de partículas floculentas se procede a graficar en función del tiempo y de la profundidad de sedimentación. En este grafico se unen todos los valores de igual magnitud de % de remoción y esta unión trae como consecuencia las curvas de isoconcentración. Estas curvas representan la trayectoria de sedimentación máxima dependiendo de % de remoción indicado y a su vez la relación profundidad/tiempo igual a la velocidad promedio mínima de sedimentación para dicha remoción. (Rojas, 1999)

La grafica generada por el proceso anterior, tiene un comportamiento similar al mostrado en la figura 5.

Figura 9. Ejemplo curvas de isoconcentración.



Fuente: (Rojas, 1999)

Como se había mencionado anteriormente se procede a calcular el % de remoción para un tiempo determinado.

$$R = \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) \left(\frac{\Delta h_1}{h_6} \right) + \left(\frac{r_2 + r_3}{2} \right) \left(\frac{\Delta h_2}{h_6} \right) + \left(\frac{r_3 + r_4}{2} \right) \left(\frac{\Delta h_3}{h_6} \right) + \dots \quad (2)$$

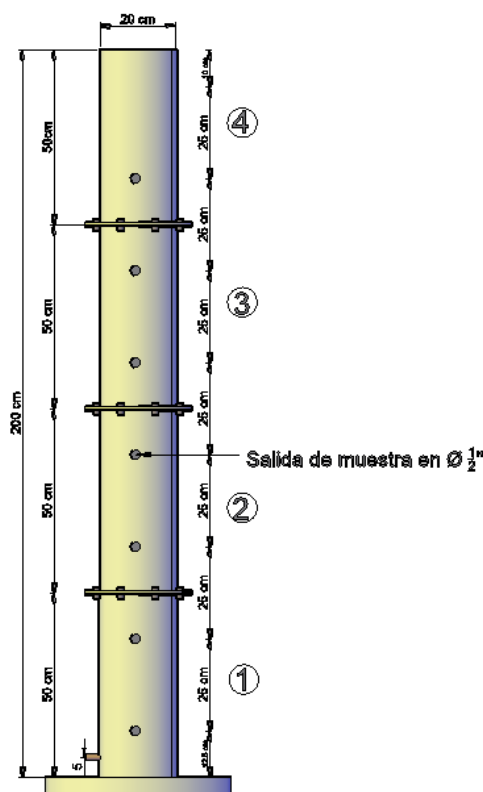
2.3 TORRE DE SEDIMENTACIÓN

En el segundo semestre del año 2016 se realizó el prototipo de la torre de sedimentación en la Universidad Católica de Colombia. Inicialmente, este prototipo tuvo como finalidad analizar el comportamiento en la sedimentación de partículas discretas (sedimentación tipo I).

En el desarrollo del prototipo se hizo uso del diseño de ingeniería concurrente. Esta metodología involucra la coordinación de funciones técnicas y no técnicas del diseño y la manufactura dentro de una organización. (Manrique Alejandro, Gomez Jhon, 2016)

Logrando una estructura de 200cm de altura, un borde libre de 10cm y un diametro de 20cm en el cuerpo de la estructura. Para lograr la altura la estructura fue dividida en 4 elementos de igual tamaño, unidos por bridas. Decisión tomada luego de analizar factores como: esbeltez, mantenimiento y futuras averias. (Manrique Alejandro, Gomez Jhon, 2016). El prototipo final tiene la siguiente configuracion visto en la figura 10.

Figura 10. Torre de sedimentación



Fuente: (Manrique Alejandro, Gomez Jhon, 2016)

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1 PREPARACIÓN DE AGUA PROBLEMA

Con base a la información anteriormente expuesta, se procedió a realizar las debidas pruebas en laboratorio, para obtener los resultados, seguidamente expuestos.

Como primera parte, se encontró la dosis de bentonita necesaria para obtener una turbiedad que se encontrará en el rango de (25-30) NTU, para esto se tomó 1 litro de agua problema a trabajar y en ella se mezcló diferentes dosis de bentonita, se midió su turbiedad, hasta encontrar la dosis que cumpliera con el rango de turbiedad deseado. Para este caso se encontró que, con 0,09 gramos de bentonita, disueltos en 1 litro de agua, la turbiedad hallada es de 26 NTU, que cumple con el rango a trabajar.

Tabla 1. Dosis bentonita por 1L de agua problema.

Bentonita (g)	Turbiedad (NTU)
1	144.3
0.5	79.3
0.2	40.3
0.1	27.3
0.09	26

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

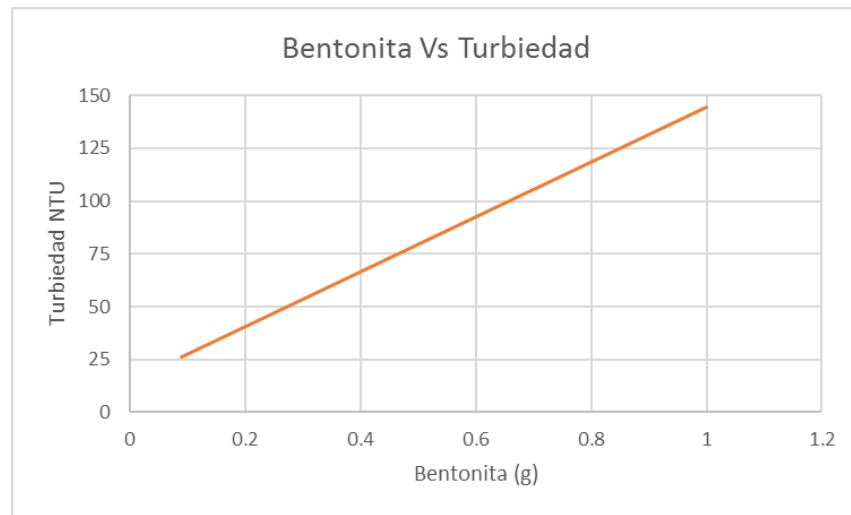
Seguidamente se procede a graficar para comprobar que la dosis de bentonita es directamente proporcional a la turbiedad generada en el agua problema, como se observa en la figura 11.

Se generó una formula sencilla para la determinación de bentonita necesaria que se requeriría al utilizar una mayor cantidad de agua.

$$Dosis\ Bentonita = 0.09 * Volumen \quad (16)$$

La dosis de bentonita es igual a 0.09 representando la dosis de bentonita utilizada por litro de agua, multiplicada por el volumen de agua a utilizar en litros.

Figura 11. Dosis bentonita Vs turbiedad



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El análisis y proceso anteriormente expuestos quieren decir que para obtener un agua problema con una turbiedad entre un rango de (25-30) NTU, se debe disolver 0.09 gramos de bentonita por cada litro de agua.

3.2 TEST DE JARRAS

Encontrada la dosis de bentonita óptima para una turbiedad entre (25-30) NTU, se procedió a realizar el test de jarras, que permitiría encontrar la dosis ideal de coagulante, que se usaría más adelante en la prueba de torre de sedimentación. Este test de jarras se realizó con diferentes tipos de coagulantes, los cuales fueron: Sulfato de aluminio tipo A, Sulfato de Aluminio tipo B, Cloruro Férrico, Polyfloc y Mackenfloc. Para los cuales se realizaron 3 pruebas por cada uno y se escogió la prueba que arrojó valores óptimos.

El agua problema fue llevada al rango trabajado de turbiedad haciendo uso de la dosis de bentonita expuesta anteriormente. Realizando la prueba de alcalinidad, se determinó la dosis de coagulante ideal para una jarra de 800ml, luego se llevaron valores de dosis por debajo y por encima para ocupar las jarras que requiere esta prueba. Se realizó la prueba en 6 jarras, con dos tipos de mezclas, rápida (25 minutos) y lenta (1 minuto), con velocidad de 100 RPM y 20 RPM, según corresponde. De igual forma, se obtuvieron las características del agua problema para cada una de las pruebas.

A continuación, se presentan los resultados para cada coagulante con una turbiedad de 26 NTU y una solución de 0,1gr de coagulante en 1L de agua destilada.

3.2.1 Sulfato de aluminio tipo A.

Se da a conocer los resultados obtenidos para la prueba de test de jarras utilizando como coagulante el sulfato de aluminio tipo A, tomando las muestras de turbiedad del agua luego del tiempo de reposo que se estipuló de 10 minutos.

En la tabla 2 se dan a conocer las propiedades del agua trabajadas para ese instante de la prueba y en la tabla 3 y figura 12, se observa el comportamiento del coagulante.

Tabla 2 Propiedades del agua, prueba sulfato de aluminio tipo A

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	82.4
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	10.81
S.S (mg/L)	49.2
Salinidad	0
T ($^{\circ}\text{C}$)	16.8
PH	6.79
Oxigeno (mg/L)	4.99
%Oxigeno (%)	70.5

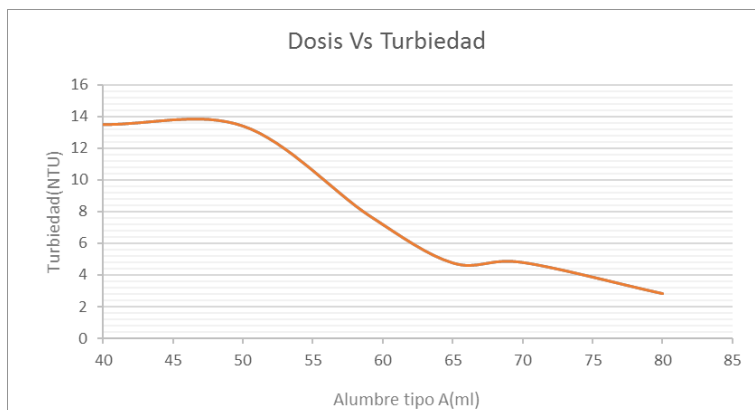
Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Tabla 3 test de jarras, dosis sulfato de aluminio tipo A.

Dosis alumbre tipo A (ml)	Turbiedad
40	13.5
50	13.4
59	7.75
65	4.75
70	4.78
80	2.81

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Figura 12. Dosis sulfato de aluminio tipo A Vs Turbiedad



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Se observa notablemente que el comportamiento de la curva es descendente, esto quiere decir que la dosis de coagulante utilizada es inversamente proporcional a la

turbiedad del agua problema. Al utilizar una dosis alta de coagulante en relación a la cantidad de agua, produciría una ruptura del floc, ocasionando un aumento de la turbiedad.

Se define la dosis ideal de coagulante sulfato de aluminio tipo A en 76ml/L. Por lo visto en la prueba de jarras se observa que este valor consigue porcentajes de remoción muy efectivos.

3.2.2 Sulfato de aluminio tipo B.

Se da a conocer los resultados obtenidos para la prueba de test de jarras utilizando como coagulante el sulfato de aluminio tipo B, tomando las muestras de turbiedad del agua luego del tiempo de reposo que se estipuló de 10 minutos.

En la tabla 4 se dan a conocer las propiedades del agua trabajadas para ese instante de la prueba y en la tabla 5 y figura 13, se observa el comportamiento del coagulante.

Tabla 4. Propiedades del agua, prueba sulfato de aluminio tipo B

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	108.7
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	9.2
S.S (mg/L)	58.5
Salinidad	0.1
T ($^{\circ}\text{C}$)	16.7
PH	5.81
Oxigeno (mg/L)	5.07
%Oxigeno (%)	70.8

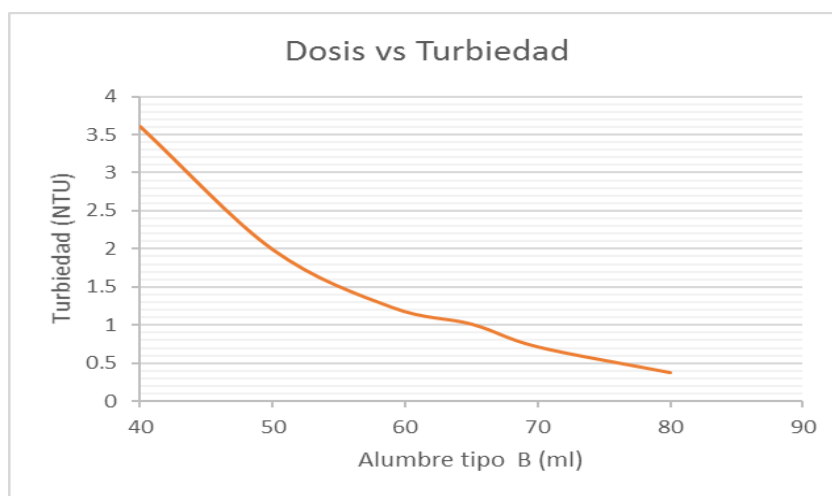
Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Tabla 5. Test de jarras, dosis sulfato de aluminio tipo B.

Dosis alumbre tipo B (ml)	Turbiedad
40	3.61
50	1.99
59	1.23
65	1.01
70	0.71
80	0.37

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Figura 13. Dosis sulfato de aluminio tipo B Vs Turbiedad.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El comportamiento de la curva es descendente, queriendo decir que la dosis de coagulante utilizada es inversamente proporcional a la turbiedad del agua problema. La relación dosis vs turbiedad, tiene el mejor comportamiento y presenta una coloración muy baja con respecto a los demás coagulantes analizados.

Se define la dosis ideal de coagulante sulfato de aluminio tipo B en 70ml/L. Por lo visto en la prueba de jarras se observa que este valor consigue porcentajes de remoción muy efectivos.

3.2.3 Cloruro férrico.

Se da a conocer los resultados obtenidos para la prueba de test de jarras utilizando como coagulante el cloruro férrico, tomando las muestras de turbiedad del agua luego del tiempo de reposo que se estipuló de 10 minutos.

En la tabla 6 se dan a conocer las propiedades del agua trabajadas para ese instante de la prueba y en la tabla 7 y figura 14, se observa el comportamiento del coagulante.

Tabla 6. Propiedades del agua, prueba cloruro férrico.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	115.4
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	8.73
S.S (mg/L)	60.6
Salinidad	0.1
T ($^{\circ}\text{C}$)	17
PH	7.49
Oxigeno (mg/L)	4.18
%Oxigeno (%)	56.1

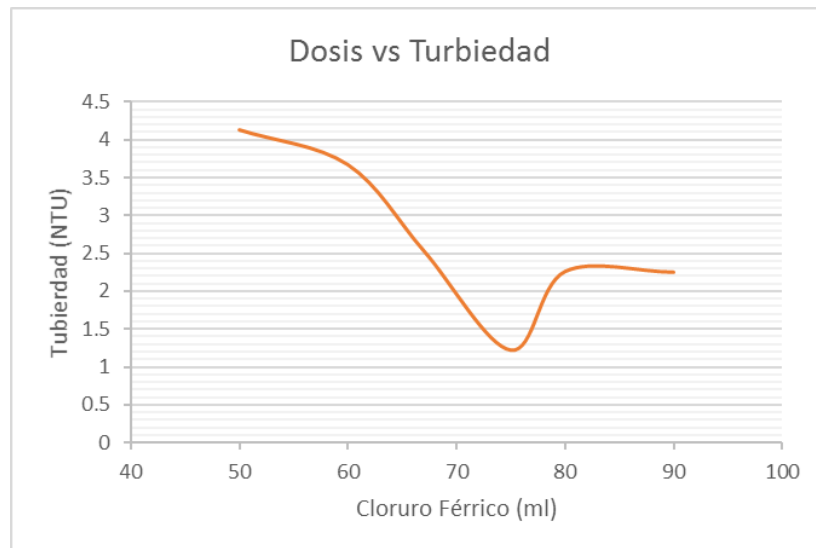
Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Tabla 7. Test de jarras, dosis cloruro férrico.

Dosis cloruro ferrico (ml)	Turbiedad
50	4.13
60	3.67
67	2.53
75	1.22
80	2.26
90	2.25

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Figura 14. Dosis de cloruro férrico Vs Turbiedad.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Se logra observar que el comportamiento de dosis de coagulante vs turbiedad, es descendente hasta un valor promedio de coagulante (75ml), luego, se observa que, ante valores muy altos de dosis, su turbiedad empieza a incrementarse. Queriendo decir que hay un rompimiento del floc.

Se define la dosis ideal de coagulante cloruro férrico en 75ml/L. Por lo visto en la prueba de jarras se observa que este valor consigue porcentajes de remoción muy efectivos.

3.2.4 Polyfloc.

Se da a conocer los resultados obtenidos para la prueba de test de jarras utilizando como coagulante el polyfloc, (el cual es un polímero poco utilizado por su elevado precio en el mercado). Tomando las muestras de turbiedad del agua luego del tiempo de reposo que se estipuló de 10 minutos.

En la tabla 8 se dan a conocer las propiedades del agua trabajadas para ese instante de la prueba y en la tabla 9 y figura 15, se observa el comportamiento del coagulante.

Tabla 8. Propiedades del agua, prueba polyfloc.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	135
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	7.78
S.S (mg/L)	68.1
Salinidad	0.1
T ($^{\circ}\text{C}$)	17.2
PH	6.83
Oxigeno (mg/L)	3.67
%Oxigeno (%)	51.9

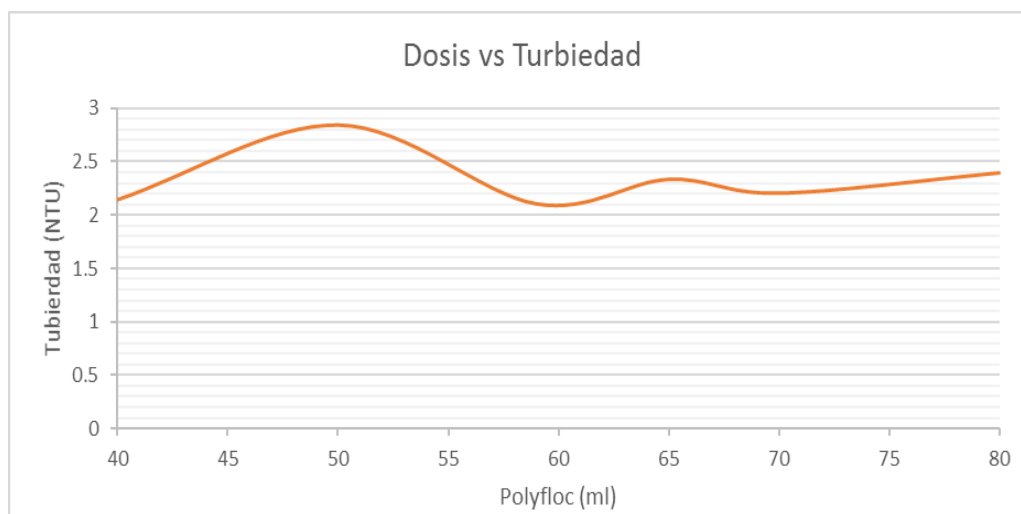
Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Tabla 9. Test de jarras, dosis polyfloc.

Dosis polyfloc (ml)	Turbiedad
40	2.15
50	2.85
59	2.11
65	2.34
70	2.21
80	2.4

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Figura 15. Dosis de polyfloc Vs Turbiedad.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Se observó que el coagulante polyfloc tiene un buen comportamiento, pero le agrega coloración al agua.

3.2.5 Mackenfloc.

Se da a conocer los resultados obtenidos para la prueba de test de jarras utilizando como coagulante el mackenfloc, (el cual es un polímero poco utilizado por su elevado precio en el mercado). Tomando las muestras de turbiedad del agua luego del tiempo de reposo que se estipuló de 10 minutos.

En la tabla 10 se dan a conocer las propiedades del agua trabajadas para ese instante de la prueba y en la tabla 11 y figura 16, se observa el comportamiento del coagulante.

Tabla 10. Propiedades del agua, prueba mackenfloc.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	135
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	7.78
S.S (mg/L)	68.1
Salinidad	0.1
T ($^{\circ}\text{C}$)	17.2
PH	6.83
Oxígeno (mg/L)	3.67
%Oxígeno (%)	51.9

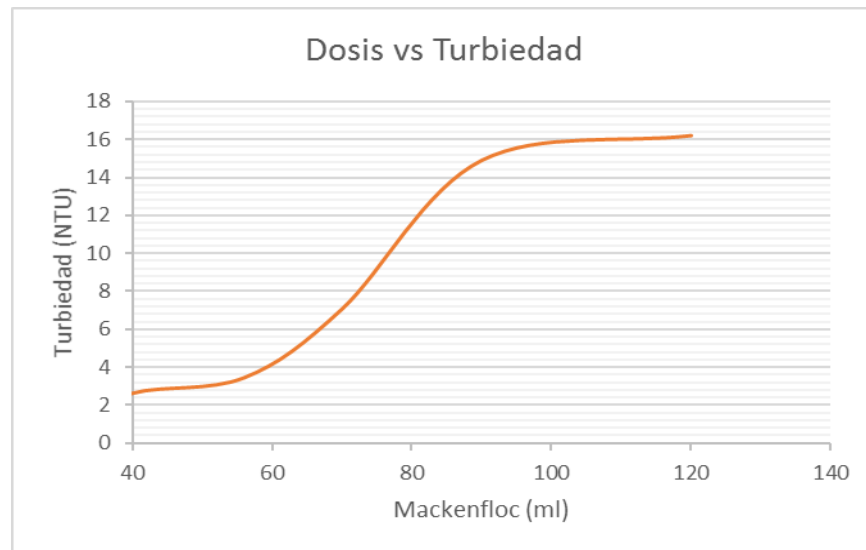
Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Tabla 11. Test de jarras, dosis mackenfloc.

Dosis Mackenfloc (ml)	Turbiedad
30	0.82
40	2.61
56	3.43
70	7.06
90	14.9
120	16.2

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Figura 16. Dosis de mackenfloc Vs Turbiedad.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Se observó que el comportamiento del mackenfloc es particular, ya que a mayor dosis de coagulante la turbiedad aumenta abruptamente, provocando un rompimiento del floc muy prematuro.

3.3 COMPARACIÓN DE LOS COAGULANTES

Teniendo en cuenta los resultados arrojados para cada uno de los coagulantes sometidos a test de jarras se logra evidenciar que:

El coagulante que mayor eficiencia en la remoción presentó, fue el sulfato de aluminio tipo B, esto para una turbiedad inicial de 26 (NTU), con un tiempo de reposo de 10 min, y finalizó con una turbiedad de 0,37 (NTU), para una dosis de 80 ml. Se tiene también que el coagulante que menor eficiencia presentó en la remoción, fue el sulfato de aluminio tipo A, sometido a las mismas condiciones, anteriormente mencionadas, el cual finalizó con una turbiedad de 2,81 (NTU), para una dosis de 80ml.

Se evidenció un caso especial para el coagulante Mackenfloc, el cual presentó su mayor eficiencia de remoción (0,82 NTU) para una dosis baja (30ml). La turbiedad analizada se fue incrementando a causa de la dosis empleada, provocando un rompimiento del floc y aumentando su turbiedad en (16,2 NTU) para una dosis alta de 120ml.

3.4 SEDIMENTACIÓN TIPO II MEDIANTE LA TORRE DE SEDIMENTACIÓN

La torre de sedimentación, que fue realizada por los estudiantes Alejandro Manrique y Jhon Gómez mostrada en la figura 17. Sirvió como herramienta para el desarrollo de las practicas ejecutadas de sedimentación tipo II en columna de sedimentación. Las practicas se llevaron a cabo con la implementación de tres coagulantes (cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B).

Figura 17. Torre de sedimentación.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Nota: Proyecto de grado de los estudiantes Alejandro Manrique y Jhon Gómez, realizado en el año 2016 en la universidad Católica de Colombia, titulado: construcción de una torre de sedimentación para la evaluación de los procesos de remoción y eficiencia en el tratamiento de agua potable.

Teniendo en cuenta la dificultad que se presenta en la elaboración de las curvas de isoconcentración, se tomó la decisión de representar los gráficos mediante la herramienta AutoCAD, con el fin de obtener una mayor precisión en el trazado y posterior evaluación de las coordenadas cartesianas, las cuales fueron llevadas a

Excel y graficadas nuevamente. Esto se realizó, con el fin de generar curvas de tendencia que evaluaran el comportamiento de cada porcentaje de remoción tomando un rango de (80%-30%) evaluadas cada 5%. Para finalmente generar una ecuación polinómica que mejor se ajuste a la curva.

A continuación, se presentan los gráficos que representan cada una de las curvas de remoción para cada uno de los coagulantes.

3.4.1 Análisis del cloruro férrico en el agua problema

3.4.1.1 Primera prueba cloruro férrico.

Debido a que el agua es un fluido que cambia sus propiedades día a día, se toman las propiedades físico químicas representadas a continuación en la tabla 12.

Tabla 12. Propiedades del agua primera prueba cloruro férrico

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	64
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	15.62
S.S (mg/L)	34
Salinidad	0
T ($^{\circ}\text{C}$)	16.4
PH	6.92
Oxígeno (mg/L)	1.07
%Oxígeno (%)	14.6

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

La variable a evaluar en principio es la turbiedad, para un tiempo máximo de 120 minutos y una profundidad máxima de 175 centímetros. El comportamiento del coagulante para esta situación se ven representados en la siguiente tabla 13.

Tabla 13. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.

		TURBIEDAD (NTU)						
tmin \ h (cm)		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
0		28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8
5		27.4	28.6	26.6	27	30	30.2	29.7
10		25.6	25.5	27.4	27.3	28.2	27.4	26.9
20		19.7	28	24.7	28	26.1	26.7	31.5
30		13.1	21.1	24.4	26.6	29.7	28.9	33.2
40		8.51	18.4	20	25.7	30.2	31.7	30.5
50		6.14	13	20.1	17.5	24.5	23.1	29.3
60		4.44	10.2	12	12.7	16.4	16.3	19.2
70		3.39	8.53	9.61	12	15.7	19.7	14.5
80			6.59	8.85	10.9	10.6	10.2	13.7
90			7.05	7.21	8.08	8.24	11.1	11.6
100			6.19	7.74	7.03	9.49	9.22	9.9
110			5.42	6.42	7.42	8.08	8.29	9.24
120			4.88	6.06	7.52	9.41	10.1	8.76

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez terminada la medición de la turbiedad para diferentes tiempos y profundidades, se calculó el porcentaje de remoción que produce el cloruro férrico en el agua problema. Teniendo en cuenta que la turbiedad inicial trabajada fue de 29.7 NTU. El porcentaje de remoción dado para los tiempos y profundidades están determinados en la siguiente tabla 14.

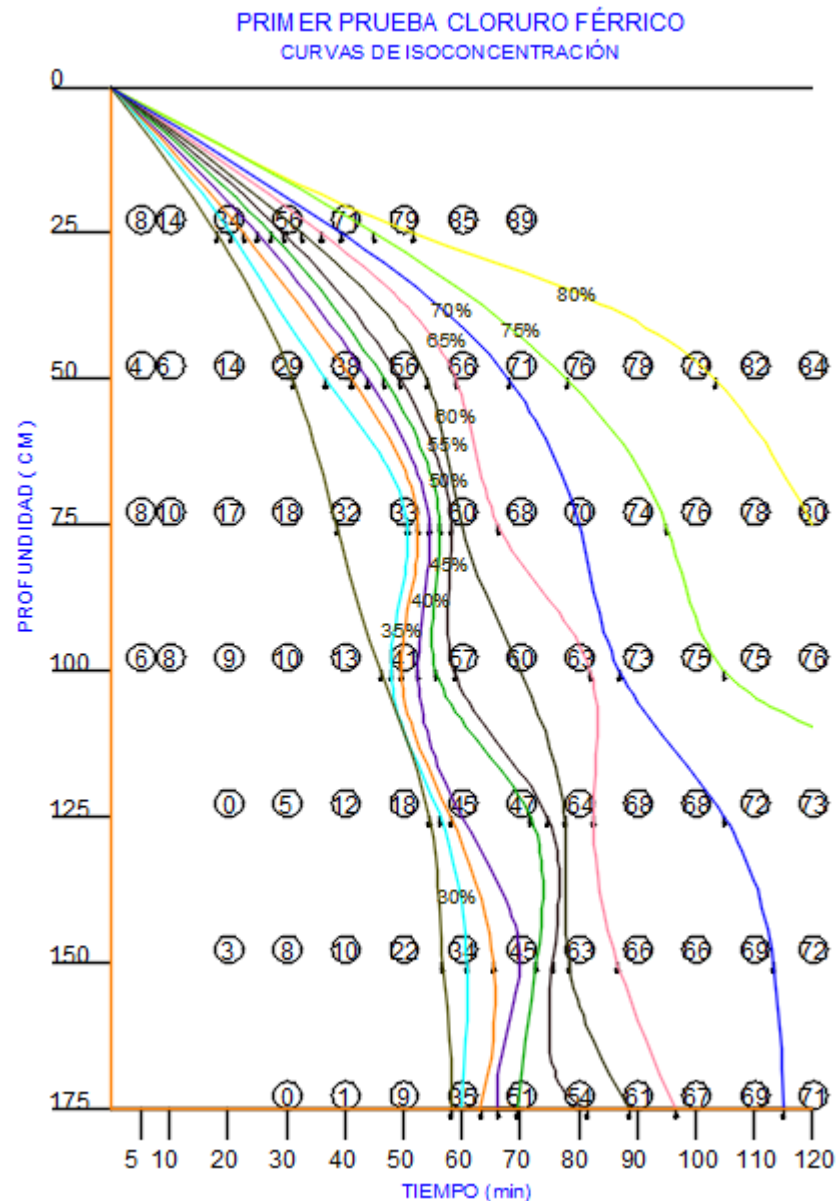
Tabla 14. % de remoción causadas por el cloruro férrico a diferentes tiempos y profundidades.

		% de remoción						
tmin \ h(cm)		25	50	75	100	125	150	175
0	3	3	3	3	3	3	3	3
5	8	4	8	6	-2	-7	-12	
10	14	6	10	8	-1	-2	-6	
20	34	14	17	9	0	3	-3	
30	56	29	18	10	5	8	0	
40	71	38	32	13	12	10	1	
50	79	56	33	41	18	22	9	
60	85	66	60	57	45	34	35	
70	89	71	68	60	47	45	51	
80		76	70	63	64	63	54	
90		78	74	73	68	66	61	
100		79	76	75	68	66	67	
110		82	78	75	72	69	69	
120		84	80	76	73	72	71	

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenido el porcentaje de remoción del coagulante para los diferentes tiempos y profundidades, se procede a graficar las curvas de isoconcentración. Vistas en la figura 18.

Figura 18. Curvas de isoconcentración generadas por cloruro férrico.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El tiempo es una variable representativa para obtener un porcentaje de remoción significativo, el mayor porcentaje de remoción obtenido en esta prueba fue de 89% para una profundidad de 25 cm y un tiempo de 70 minutos. Así mismo se observó una variación en la turbiedad del agua problema causada por la mezcla rápida y

lenta que se ven representadas en los primeros 5 minutos, la cual se puede ver con mayor claridad en la tabla 13.

Teniendo las curvas de isoconcentración graficadas, se procede a referenciar coordenadas cartesianas para cada una de las curvas, hallando las profundidades tomando tiempos de cada 5 minutos. Lo anteriormente dicho se puede observar en la tabla 15.

Tabla 15. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.

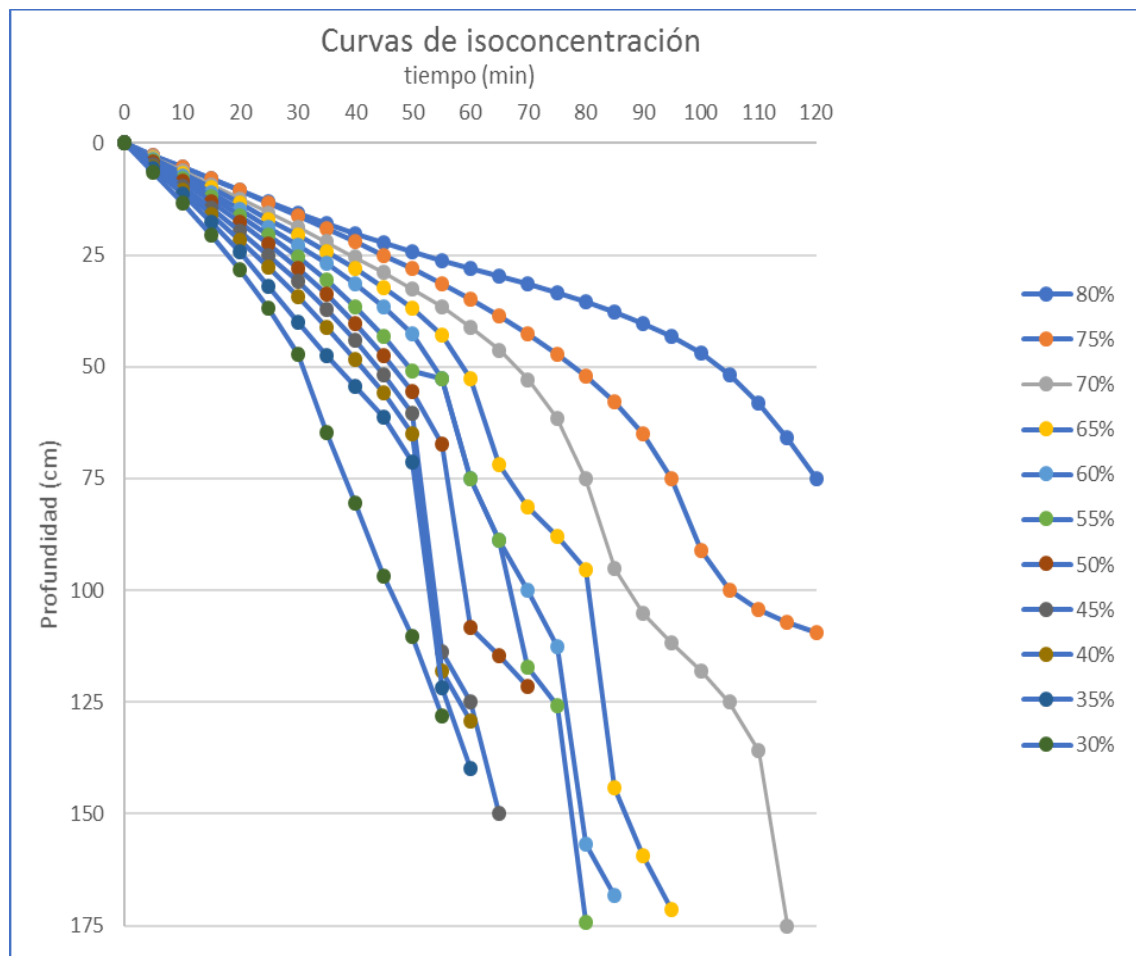
1ER PRUEBA CLORURO FERRICO											
% de remoción NTU											
tmin	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.71	2.63	3.07	3.32	3.66	3.91	4.27	4.72	5.25	5.67	6.61
10	5.40	5.27	6.15	6.67	7.34	7.88	8.60	9.51	10.56	11.48	13.38
15	8.05	7.94	9.25	10.04	11.06	11.95	13.05	14.42	16.03	17.63	20.48
20	10.65	10.63	12.38	13.47	14.87	16.18	17.70	19.56	21.74	24.35	28.16
25	13.18	13.37	15.55	16.97	18.77	20.68	22.63	25.00	27.81	31.96	36.81
30	15.63	16.17	18.78	20.56	22.80	25.45	27.95	30.88	34.32	40.00	47.25
35	17.98	19.03	22.08	24.25	26.98	30.68	33.78	37.25	41.21	47.64	64.73
40	20.23	21.97	25.45	28.07	31.44	36.49	40.22	44.19	48.38	54.45	80.35
45	22.36	25.00	28.93	32.20	36.49	43.11	47.41	51.75	55.84	61.31	96.94
50	24.36	28.14	32.61	36.92	42.76	50.94	55.59	60.49	65.05	71.30	110.42
55	26.24	31.43	36.60	42.88	52.65	52.65	67.30	113.71	118.17	121.75	128.12
60	28.03	34.91	41.07	52.70	75.00	75.00	108.40	125.00	129.33	139.79	
65	29.78	38.63	46.30	71.98	88.89	88.89	114.73	150.00			
70	31.56	42.67	52.81	81.28	100.00	117.27	121.58				
75	33.42	47.10	61.54	87.96	112.72	125.75					
80	35.43	52.06	75.00	95.39	156.80	174.26					
85	37.66	57.78	95.10	144.21	168.33						
90	40.22	64.85	105.15	159.37							
95	43.25	75.00	111.79	171.25							
100	46.96	90.97	117.95								
105	51.75	100.00	125.00								
110	58.06	104.25	135.86								
115	65.97	107.13	175.00								
120	75.00	109.56									

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas para cada una de las curvas de % de remoción, se procede a graficar nuevamente los valores obtenidos. Dando como resultado una nueva gráfica que representa cada una de las curvas. De estas es obtenida una curva de tendencia junto a una ecuación polinómica de grado 2 y cada

una con su respectiva correlación que simboliza su grado de exactitud. Las graficas generadas por las nuevas coordenadas cartecianas en funcion del tiempo de remocion y de la profundidad se pueden evidenciar en la figura 19.

Figura 19. Curvas de isoconcentración para cloruro férrico.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.4.1.2 Segunda prueba cloruro férrico.

Teniendo en cuenta que el agua es un fluido que cambia constantemente, debido a cambios climáticos, se debe medir las propiedades físicas químicas representadas a continuación en la tabla 16.

Tabla 16. Propiedades del agua problema para prueba de cloruro férrico.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	65,3
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	15,31
S.S (mg/L)	34,7
Salinidad	0
T ($^{\circ}\text{C}$)	16,1
PH	6,92
Oxígeno (mg/L)	1,1
%Oxígeno (%)	15,1

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Como se mencionó anteriormente, la variable a evaluar en principio es la turbiedad, para un tiempo máximo de 120 minutos y una profundidad máxima de 175 centímetros. El comportamiento del coagulante para esta situación se ven representados en la siguiente tabla 17.

Tabla 17. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.

		TURBIEDAD (NTU)						
tmin \ h (cm)		0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
	0	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9
	5	28,7	28,9	26,1	30	30,5	33,6	34,3
	10	24,4	26,8	26,6	26,6	26,6	26,5	27,9
	20	23,6	26,3	26,1	26,5	26,9	28,8	29,6
	30	16,4	23,2	24,1	29	27,8	36,1	29
	40	10,4	16,8	18,1	24,6	26	31,4	32,2
	50	7,4	12,7	15,4	18,6	20,1	19,3	26,5
	60	5,31	10,1	10,5	14,2	14,8	16,7	23,2
	70	3,1	7,84	9,33	9,81	10,4	13,5	18
	80	3	7,7	8,24	9,71	10,2	14,2	10,8
	90		6,32	6,32	7,77	9,15	9,76	10,3
	100		5,22	5,71	6,59	7,73	7,79	7,85
	110		5,25	5,66	5,93	7,3	8,3	8,11
	120		4,51	5,69	5,58	6,09	7,97	6,76

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez terminada la medición de la turbiedad para diferentes tiempos y profundidades, se calcula el porcentaje de remoción que produce el cloruro férrico en el agua problema trabajada. Esto teniendo en cuenta que la turbiedad inicial trabajada fue de 29.4 NTU. El porcentaje de remoción dado para los tiempos y profundidades están determinados en la siguiente tabla 18.

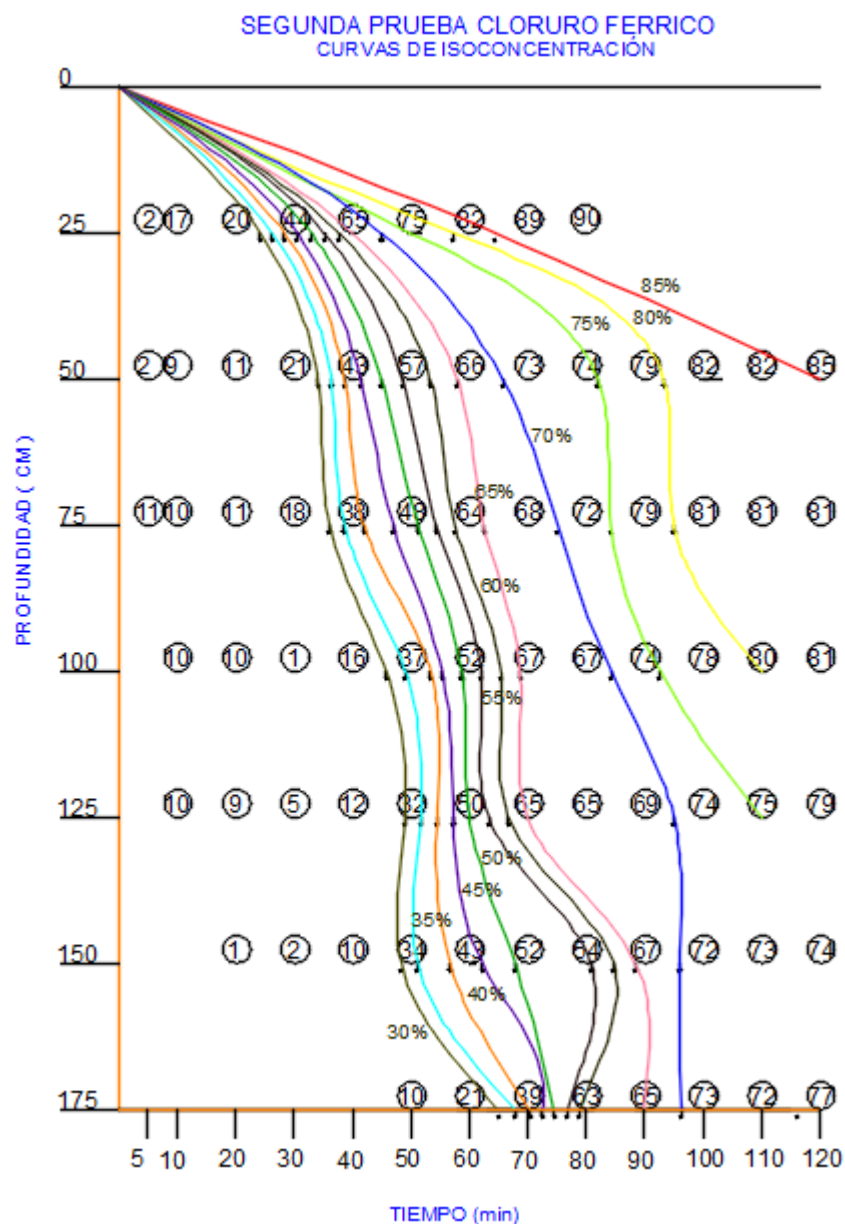
Tabla 18. % de remoción causadas por el cloruro férrico a diferentes tiempos y profundidades.

		% de remoción						
tmin \ h(cm)		25	50	75	100	125	150	175
0		-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
5		2	2	11	-2	-4	-5	-7
10		17	9	10	10	10	-2	5
20		20	11	11	10	9	1	-1
30		44	21	18	1	5	2	1
40		65	43	38	16	12	10	-10
50		75	57	48	37	32	34	10
60		82	66	64	52	50	43	21
70		89	73	68	67	65	52	39
80		90	74	72	67	65	54	63
90			79	79	74	69	67	65
100			82	81	78	74	72	73
110			82	81	80	75	73	72
120			85	81	81	79	74	77

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenido el porcentaje de remoción del coagulante para los diferentes tiempos y profundidades, se procede a graficar las curvas de isoconcentración. Vistas en la figura 20.

Figura 20. Curvas de isoconcentración generadas por cloruro férrico.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El tiempo es una variable representativa para obtener un porcentaje de remoción significativo, el mayor porcentaje de remoción obtenido en esta prueba fue de 90% para una profundidad de 25 cm y un tiempo de 80 minutos. Así mismo se observó una variación en la turbiedad del agua problema causada por la mezcla rápida y lenta que se ven representadas en los primeros 5 minutos, la cual se puede ver con mayor claridad en la tabla 17.

Teniendo las curvas de isoconcentración graficadas, se procede a referenciar coordenadas cartesianas para cada una de las curvas, hallando las profundidades tomando tiempos de cada 5 minutos. Lo anteriormente dicho se puede observar en la tabla 19.

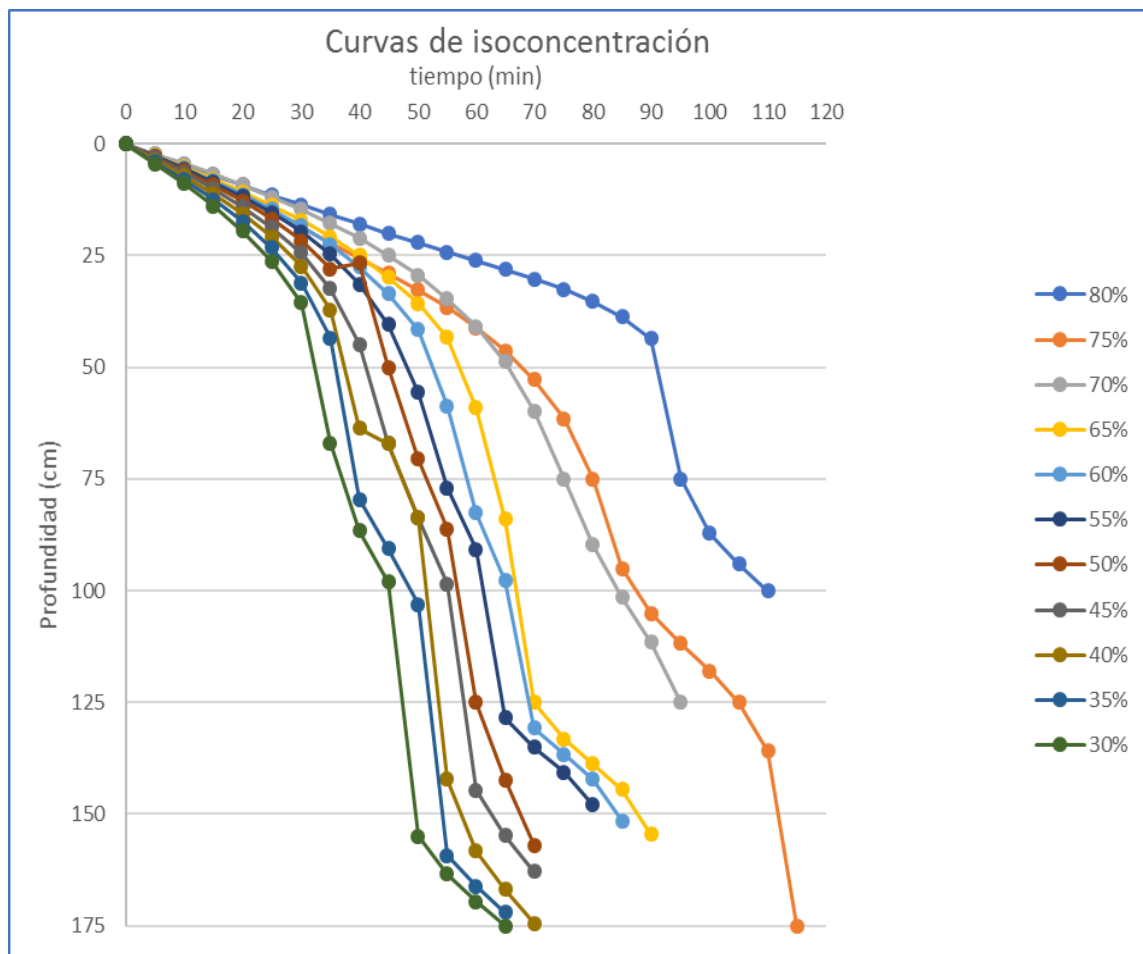
Tabla 19. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.

SEGUNDA PRUEBA CLORURO FERRICO											
% de remoción											
tmin	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2,32	2,93	2,22	2,55	2,67	2,74	2,93	3,19	3,54	3,94	4,38
10	4,62	5,08	4,47	5,17	5,41	5,55	5,96	6,49	7,21	8,02	8,93
15	6,89	7,61	6,80	7,88	8,26	8,53	9,16	10,03	11,15	12,41	13,85
20	9,19	10,14	9,23	10,73	11,30	11,76	12,69	13,97	15,57	17,36	19,44
25	11,44	12,75	11,83	13,78	14,61	15,38	16,74	18,58	20,78	23,28	26,26
30	13,65	15,15	14,64	17,12	18,31	19,60	21,60	24,35	27,44	31,05	35,61
35	15,83	17,64	17,71	20,82	22,52	24,72	27,90	32,41	37,09	43,43	66,96
40	17,98	20,11	21,13	25,00	27,46	31,34	26,69	44,88	63,71	79,59	86,52
45	20,08	22,56	25,00	29,82	33,49	40,41	50,00	67,02	67,02	90,60	98,03
50	22,13	25,00	29,44	35,62	41,52	55,58	70,50	83,70	83,70	103,13	155,04
55	24,15	27,44	34,62	43,32	58,62	76,94	86,13	98,54	142,16	159,23	163,44
60	26,12	29,97	40,82	59,04	82,53	90,79	125,00	144,66	158,26	166,22	169,53
65	28,11	32,75	48,67	84,04	97,70	128,42	142,34	154,78	166,94	171,97	175,00
70	30,21	35,95	59,80	125,00	130,78	135,03	157,04	162,82	174,40		
75	32,53	39,97	75,00	133,14	136,60	140,69					
80	35,24	45,92	89,74	138,73	142,15	148,00					
85	38,66	79,93	101,50	144,48	151,58						
90	43,63	95,06	111,60	154,50							
95	75,00	104,31	125,00								
100	87,11	111,83									
105	94,03	118,58									
110	100,00	120,00									
115											
120											

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas para cada una de las curvas de % de remoción, se procede a graficar nuevamente los valores obtenidos. Dando como resultado una nueva gráfica que representa cada una de las curvas. De estas es obtenida una curva de tendencia junto a una ecuación polinómica de grado 2 y cada una con su respectiva correlación que simboliza su grado de exactitud. Las gráficas generadas por las nuevas coordenadas cartesianas en función del tiempo de remoción y de la profundidad se pueden evidenciar en la figura 21.

Figura 21. Curvas de isoconcentración para cloruro férrico.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.4.2 Análisis de sulfato de aluminio tipo A en el agua problema

3.4.2.1 Primera prueba de sulfato de aluminio tipo A.

Debido a que el agua es un fluido que cambia sus propiedades día a día, se toman las propiedades físico químicas representadas a continuación en la tabla 20.

Tabla 20. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo A.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	65,3
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	15,31
S.S (mg/L)	34,7
Salinidad	0
T ($^{\circ}\text{C}$)	16,1
PH	6,92
Oxígeno (mg/L)	1,1
%Oxígeno (%)	15,1

(Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

La variable a evaluar en principio es la turbiedad, para un tiempo máximo de 120 minutos y una profundidad máxima de 175 centímetros. El comportamiento del coagulante para esta situación se ven representados en la siguiente tabla 21.

Tabla 21. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.

		TURBIEDAD (NTU)						
tmin \ h (cm)		0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
0		27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7
5		25,1	26,8	23,7	26,5	30,3	29,1	32,2
10		23,7	23,5	25	24,8	25,2	26,2	27,7
20		20,1	22,9	23,9	26,5	25,1	24,4	30
30		17,4	21,2	23	28	28,1	26,8	27,7
40		11,8	22,5	21,3	21,1	24,1	23,5	24,8
50		7,96	14,5	17,2	18,1	26,2	29,5	29,9
60		6,2	8,3	11,6	15,6	19,7	21	24,6
70		4,58	9,61	14	14,1	13	24	16,1
80		4	7,98	11	10,5	11,9	19,5	12,2
90			7,68	8,73	10,9	9,65	11,2	10,7
100			7,2	8,63	8,57	8,93	10,3	12,1
110			6,25	7,2	8,03	8,79	8,7	10
120			6,18	6,47	7,06	8,18	9,23	9,6

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez terminada la medición de la turbiedad para diferentes tiempos y profundidades, se calcula el porcentaje de remoción que produce el sulfato de aluminio tipo A en el agua problema trabajada. Esto teniendo en cuenta que la turbiedad inicial trabajada fue de 26.6 NTU. El porcentaje de remoción dado para los tiempos y profundidades están determinados en la siguiente tabla 22.

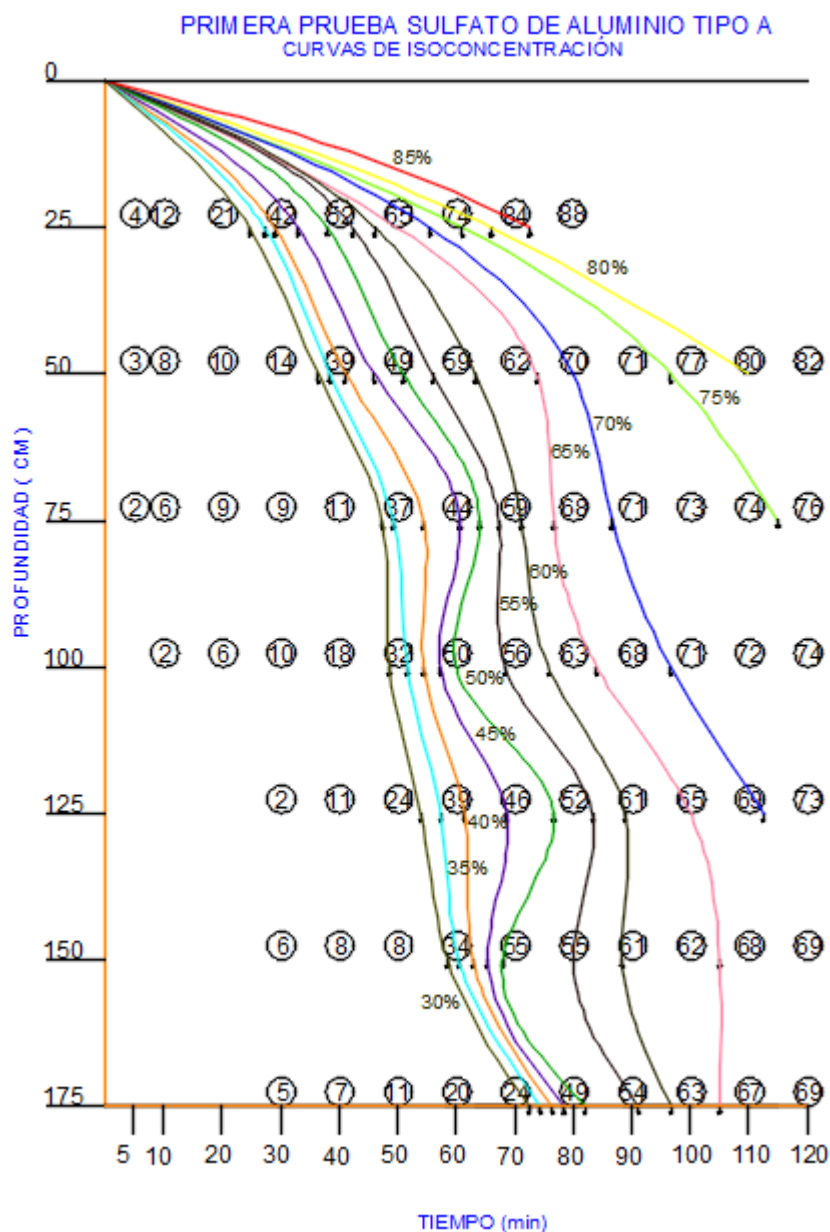
Tabla 22. % de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo A a diferentes tiempos y profundidades.

% de remoción							
tmin \ h(cm)	25	50	75	100	125	150	175
0	1	1	1	1	1	1	1
5	4	3	2	-6	-9	-15	-15
10	12	8	6	2	-6	-14	-15
20	21	10	9	6	-5	-7	-9
30	42	14	9	10	2	6	5
40	52	39	11	18	11	8	7
50	65	49	37	32	24	8	11
60	74	59	44	50	39	34	20
70	84	62	59	56	46	55	24
80	88	70	68	63	52	55	49
90		71	71	68	61	61	54
100		77	73	71	65	62	63
110		80	74	72	69	68	67
120		82	76	74	73	69	69

(Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenido el porcentaje de remoción del coagulante para los diferentes tiempos y profundidades, se procede a graficar las curvas de isoconcentración. Vistas en la figura 22.

Figura 22. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo A.



Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El tiempo es una variable representativa para obtener un porcentaje de remoción significativo, el mayor porcentaje de remoción obtenido en esta prueba fue de 88% para una profundidad de 25 cm y un tiempo de 80 minutos. Así mismo se observó una variación en la turbiedad del agua problema causada por la mezcla rápida y lenta que se ven representadas en los primeros 5 minutos, la cual se puede ver con mayor claridad en la tabla 21.

Teniendo las curvas de isoconcentración graficadas, se procede a referenciar coordenadas cartesianas para cada una de las curvas, hallando las profundidades tomando tiempos de cada 5 minutos. Lo anteriormente dicho se puede observar en la tabla 23.

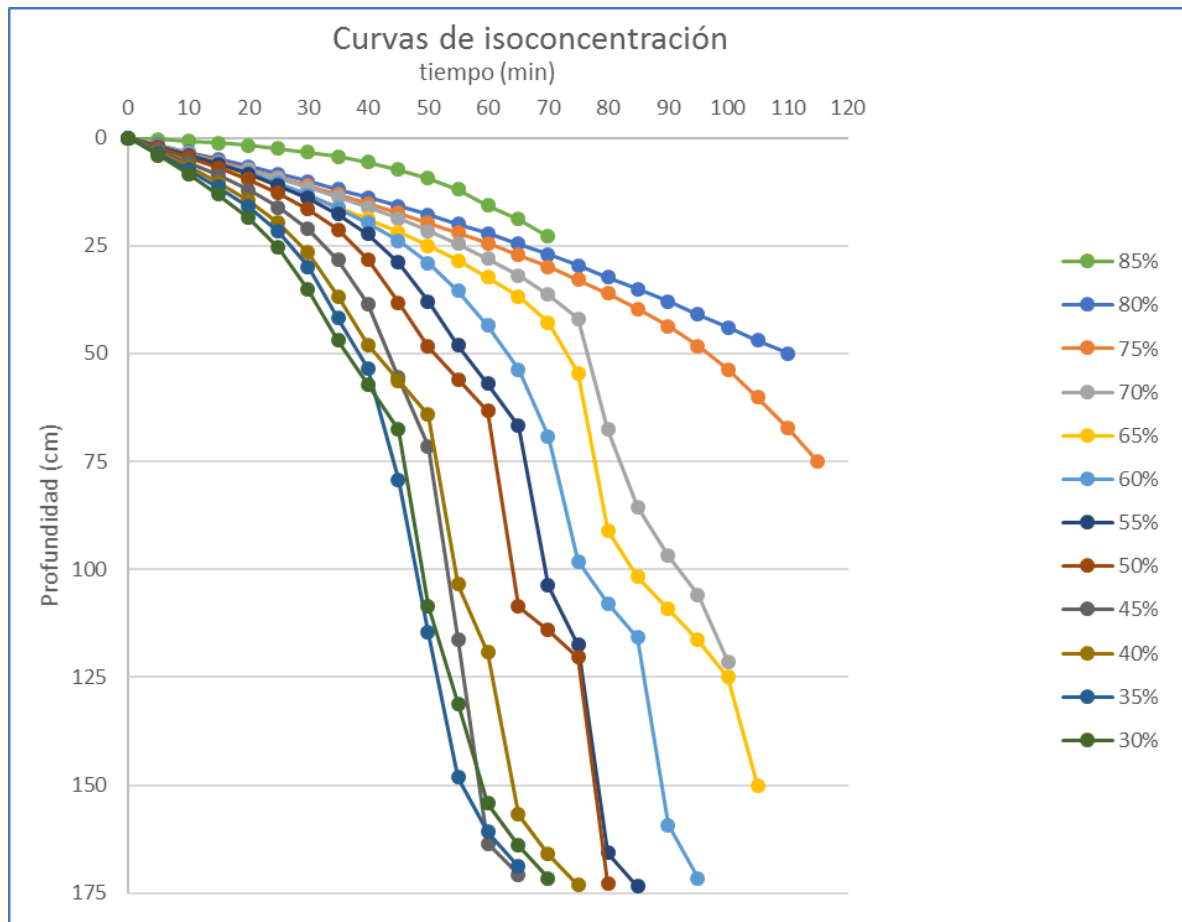
Tabla 23. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.

PRIMER PRUEBA SULFATO DE ALUMINIO TIPO A												
% de remoción												
tmin	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,37	1,64	1,84	1,79	2,12	1,93	2,03	2,24	2,76	3,29	3,58	4,13
10	0,77	3,30	3,67	3,60	4,27	3,90	4,07	4,55	5,62	6,71	7,31	8,43
15	1,24	4,96	5,47	5,97	6,46	5,97	6,07	7,01	8,68	10,40	11,35	13,12
20	1,79	6,66	7,32	7,32	8,72	8,16	8,38	9,72	12,10	14,59	15,98	18,54
25	2,47	8,38	9,22	9,37	11,07	10,55	11,07	12,82	16,09	19,66	21,72	25,42
30	3,32	10,15	11,17	11,48	13,55	13,21	13,99	16,52	21,10	26,53	29,88	35,21
35	4,38	11,97	13,18	13,72	16,13	16,23	17,64	21,27	28,24	36,80	41,72	46,95
40	5,70	13,85	15,26	16,13	18,89	19,73	22,30	28,12	38,53	47,92	53,41	57,1
45	7,35	15,80	17,42	18,73	21,84	23,91	28,82	38,19	55,57	56,32	79,19	67,53
50	9,40	17,83	19,67	21,56	25,00	29,05	37,94	48,31	71,53	64,17	114,58	108,4
55	11,96	19,95	22,02	24,64	28,43	35,44	48,11	55,92	116,18	103,40	148,09	131,1
60	15,72	22,18	24,49	28,04	32,27	43,44	57,01	63,26	163,51	119,14	160,78	154,2
65	18,83	24,52	27,09	31,86	36,82	53,73	66,68	108,52	170,68	156,81	168,77	163,9
70	22,90	26,98	29,86	36,33	42,81	69,19	103,69	113,98		165,95		171,5
75		29,57	32,83	41,91	54,60	98,13	117,54	120,37		173,09		
80		32,28	36,07	67,54	90,93	107,89	165,70	172,89				
85		35,08	39,65	85,53	101,75	115,80	173,40					
90		37,96	43,68	96,82	109,23	159,16						
95		40,91	48,30	105,88	116,30	171,53						
100		43,91	53,74	121,34	125,00							
105		46,95	60,12		150,00							
110		50,00	67,31									
115			75,00									
120												

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas para cada una de las curvas de % de remoción, se procede a graficar nuevamente los valores obtenidos. Dando como resultado una nueva gráfica que representa cada una de las curvas. De estas es obtenida una curva de tendencia junto a una ecuación polinómica de grado 2 y cada una con su respectiva correlación que simboliza su grado de exactitud. Las gráficas generadas por las nuevas coordenadas cartesianas en función del tiempo de remoción y de la profundidad se pueden evidenciar en la figura 23.

Figura 23. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo A.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.4.2.2 Segunda prueba de sulfato de aluminio tipo A

Teniendo en cuenta que el agua es un fluido que cambia constantemente, debido a cambios climáticos, se debe medir las propiedades físicas químicas representadas a continuación en la tabla 24.

Tabla 24. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo A.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	73,7
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	13,64
S.S (mg/L)	39,4
Salinidad	0
T ($^{\circ}\text{C}$)	16,1
PH	7,83
Oxigeno (mg/L)	11,3
%Oxigeno (%)	15,5

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Como se mencionó anteriormente, la variable a evaluar en principio es la turbiedad, para un tiempo máximo de 120 minutos y una profundidad máxima de 175 centímetros. El comportamiento del coagulante para esta situación se ven representados en la siguiente tabla 25.

Tabla 25. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.

		TURBIEDAD (NTU)						
tmin \ h (cm)		0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
	0	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
	5	25,6	25,9	25,1	24	27,8	28,2	31,5
	10	23,4	24,5	24,3	25,1	23,6	24,6	24,8
	20	21,1	23,9	24,1	26	26	25	25,2
	30	15,5	23	26,2	28,4	32,6	30,6	30,6
	40	12,9	16,2	23,6	21,7	32,5	30,4	30,5
	50	9,29	13,6	16,7	18,1	20,3	24,5	23,7
	60	6,93	11	15	13,3	16,3	17,6	21,4
	70	4,27	10	11	11,6	14,4	11,9	20,3
	80	3,16	7,96	8,43	9,73	10,3	11,9	13,6
	90	2,98	7,66	7,61	8,47	12,9	10,5	12,2
	100		6,05	7,07	7,69	9,21	8,44	9,81
	110		5,38	6,83	7,36	8,25	10	8,83
	120		4,85	6,49	6,86	7,3	8,26	8,12

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez terminada la medición de la turbiedad para diferentes tiempos y profundidades, se calcula el porcentaje de remoción que produce el sulfato de aluminio tipo A en el agua problema trabajada. Esto teniendo en cuenta que la turbiedad inicial trabajada fue de 26.8 NTU. El porcentaje de remoción dado para los tiempos y profundidades están determinados en la siguiente tabla 26.

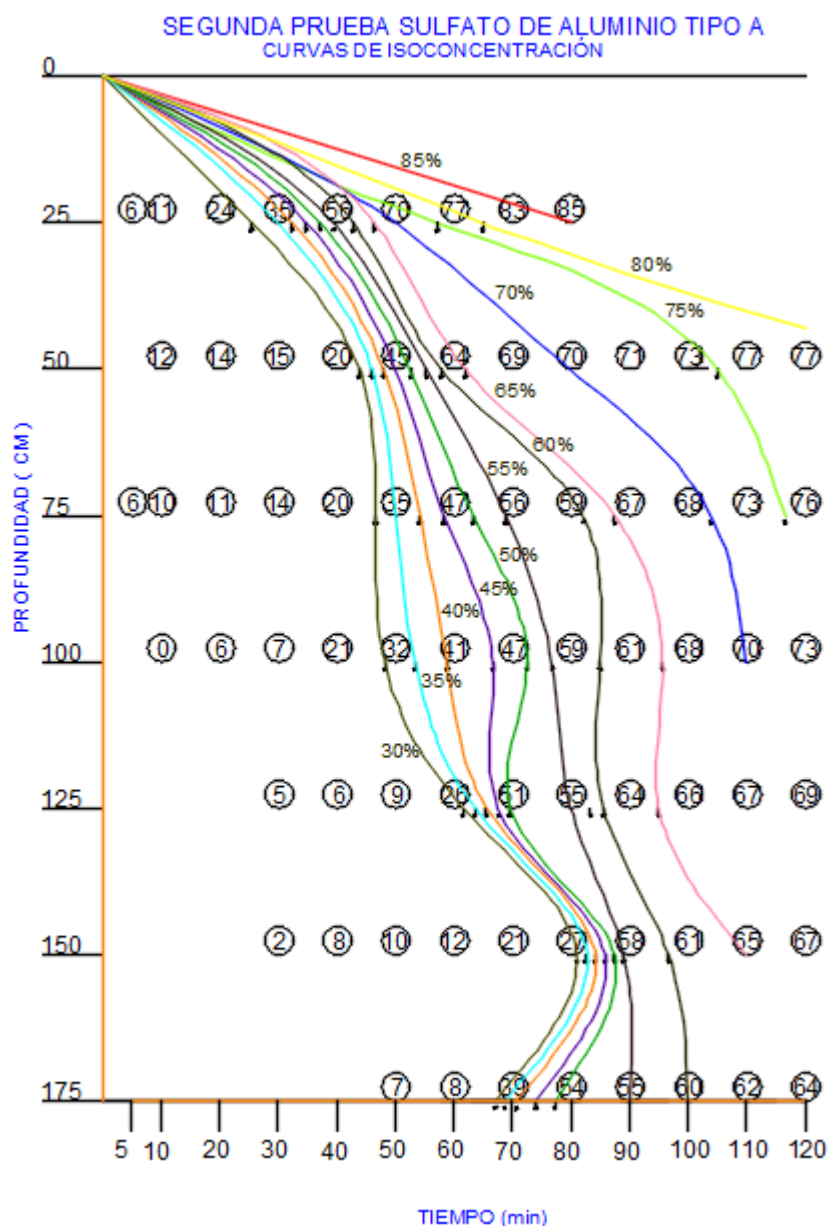
Tabla 26. Porcentaje de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo A, a diferentes tiempos y profundidades.

		% de remoción						
tmin \ h(cm)		25	50	75	100	125	150	175
0		-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5		6	-1	6	-5	-14	-11	-9
10		11	12	10	0	-6	-9	-7
20		24	14	11	0	2	-1	-5
30		35	15	14	7	5	2	-4
40		56	20	20	21	6	8	-4
50		70	45	35	32	9	10	7
60		77	64	47	41	26	12	8
70		83	69	56	47	51	21	39
80		85	70	59	59	55	27	54
90			71	67	61	64	58	55
100			73	68	68	66	61	60
110			77	73	70	67	65	62
120			77	76	73	69	67	64

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenido el porcentaje de remoción del coagulante para los diferentes tiempos y profundidades, se procede a graficar las curvas de isoconcentración. Vistas en la figura 24.

Figura 24. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo A.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El tiempo es una variable representativa para obtener un porcentaje de remoción significativo, el mayor porcentaje de remoción obtenido en esta prueba fue de 85% para una profundidad de 25 cm y un tiempo de 80 minutos. Así mismo se observó una variación en la turbiedad del agua problema causada por la mezcla rápida y lenta que se ven representadas en los primeros 5 minutos, la cual se puede ver con mayor claridad en la tabla 25.

Teniendo las curvas de isoconcentración graficadas, se procede a referenciar coordenadas cartesianas para cada una de las curvas, hallando las profundidades tomando tiempos de cada 5 minutos. Lo anteriormente dicho se puede observar en la tabla 27.

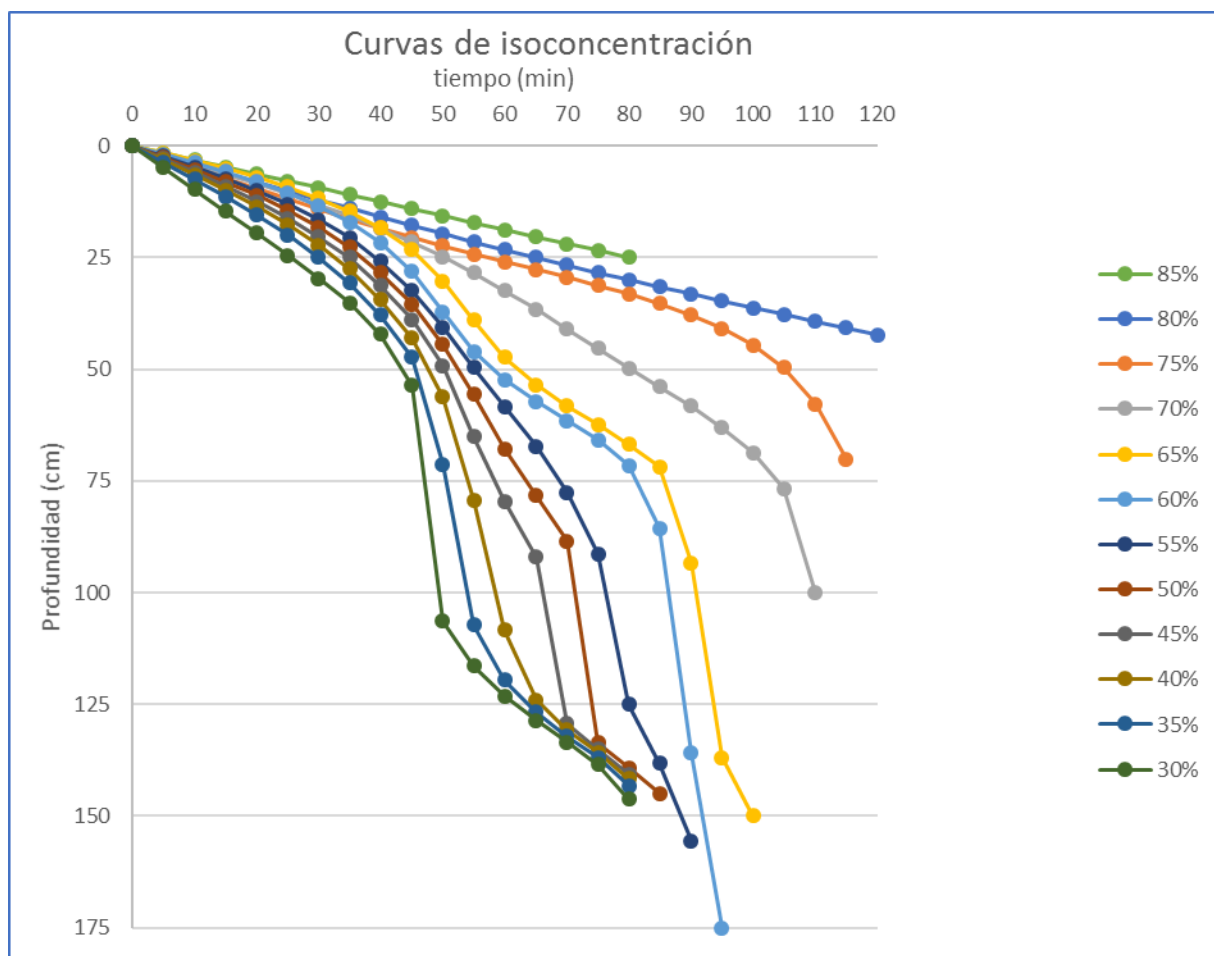
Tabla 27. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.

SEGUNDA PRUEBA SULFATO DE ALUMINIO TIPO A												
% de remoción												
tmin	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1,56	2,02	2,42	2,05	1,63	1,84	2,34	2,60	2,93	3,19	3,67	4,83
10	3,13	4,04	4,83	4,13	3,30	3,74	4,74	5,26	5,92	6,45	7,42	9,69
15	4,69	6,05	7,21	6,24	5,07	5,76	7,27	8,06	9,06	9,87	11,32	14,58
20	6,25	8,06	9,56	8,43	7,01	7,98	10,00	11,08	12,42	13,54	15,46	19,52
25	7,81	10,04	11,87	10,72	9,19	10,48	13,04	14,42	16,14	17,61	19,97	24,55
30	9,38	12,01	14,11	13,13	11,70	13,41	16,51	18,24	20,33	22,22	25,00	29,69
35	10,93	13,94	16,27	15,66	14,66	16,98	20,56	22,68	25,00	27,57	30,65	35,17
40	12,50	15,88	18,40	18,46	18,40	21,59	25,76	28,36	31,25	34,39	37,79	42,16
45	14,06	17,77	20,43	21,45	23,27	28,12	32,39	35,45	38,78	43,03	47,34	53,63
50	15,63	19,64	22,38	24,76	30,18	37,18	40,57	44,42	49,11	56,13	71,21	106,3
55	17,19	21,46	24,23	28,41	39,01	46,01	49,53	55,55	65,14	79,29	107,23	116,4
60	18,75	23,25	26,00	32,38	47,30	52,39	58,28	67,74	79,56	108,44	119,58	123,2
65	20,31	25,00	27,71	36,60	53,43	57,15	67,22	78,26	92,01	124,00	126,72	128,6
70	21,88	26,70	29,42	40,96	58,19	61,44	77,49	88,49	129,37	130,73	132,11	133,5
75	23,42	28,35	31,21	45,29	62,38	65,79	91,27	133,60	135,07	135,82	136,96	138,4
80	25,00	30,00	33,14	49,71	66,85	71,58	125,00	139,23	140,63	141,69	143,28	146,3
85		31,59	35,28	53,90	71,83	85,59	138,23	144,97				
90		33,16	37,78	58,25	93,34	135,85	155,59					
95		34,72	40,80	63,04	136,97	175,00						
100		36,24	44,57	68,68	150,00							
105		37,72	49,63	76,76								
110		39,25	57,79	100,00								
115		40,74	70,12									
120		42,23										

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas para cada una de las curvas de % de remoción, se procede a graficar nuevamente los valores obtenidos. Dando como resultado una nueva gráfica que representa cada una de las curvas. De estas es obtenida una curva de tendencia junto a una ecuación polinómica de grado 2 y cada una con su respectiva correlación que simboliza su grado de exactitud. Las gráficas generadas por las nuevas coordenadas cartesianas en función del tiempo de remoción y de la profundidad se pueden evidenciar en la figura 25.

Figura 25. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo A.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.4.3 Análisis sulfato de aluminio tipo B en el agua problema

3.4.3.1 Primera prueba de sulfato de aluminio tipo B.

Debido a que el agua es un fluido que cambia sus propiedades día a día, se toman las propiedades físico químicas representadas a continuación en la tabla 28.

Tabla 28. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo B.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	69,8
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	14,4
S.S (mg/L)	36,9
Salinidad	0
T ($^{\circ}\text{C}$)	16,9
PH	6,93
Oxígeno (mg/L)	1,01
%Oxígeno (%)	14,2

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

La variable a evaluar en principio es la turbiedad, para un tiempo máximo de 120 minutos y una profundidad máxima de 175 centímetros. El comportamiento del coagulante para esta situación se ven representados en la siguiente tabla 29.

Tabla 29. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.

		TURBIEDAD (NTU)						
tmin \ h (cm)		0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
0		26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7
5		25,3	28,8	24,2	23,7	25,8	27,7	26,3
10		24,3	24,1	24,3	23,5	25,1	25,3	24,9
20		22,8	23	24,3	24,6	24	24,5	24,2
30		18,6	22	24,9	24,2	28	24,5	22
40		16,4	21,2	22,4	23,4	27,1	25,5	25,7
50		12,8	18,5	20,7	24,7	25,5	24,1	24,1
60		10	15,5	18,1	20	18	21,7	24,9
70		8,25	13	14,2	16,4	17,1	20,9	20,4
80		8,18	11,8	16,2	14,5	16,4	16,5	17,3
90			10,2	11,2	13,3	13,6	15,7	14,6
100			9,97	11,3	11,4	12,8	14,4	13,3
110			8,43	9,28	13	11,6	14	13,6
120			7,62	8,61	10,2	10,7	10,6	11,4

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez terminada la medición de la turbiedad para diferentes tiempos y profundidades, se calcula el porcentaje de remoción que produce el sulfato de aluminio tipo B en el agua problema trabajada. Esto teniendo en cuenta que la turbiedad inicial trabajada fue de 25.7 NTU. El porcentaje de remoción dado para los tiempos y profundidades están determinados en la siguiente tabla 30.

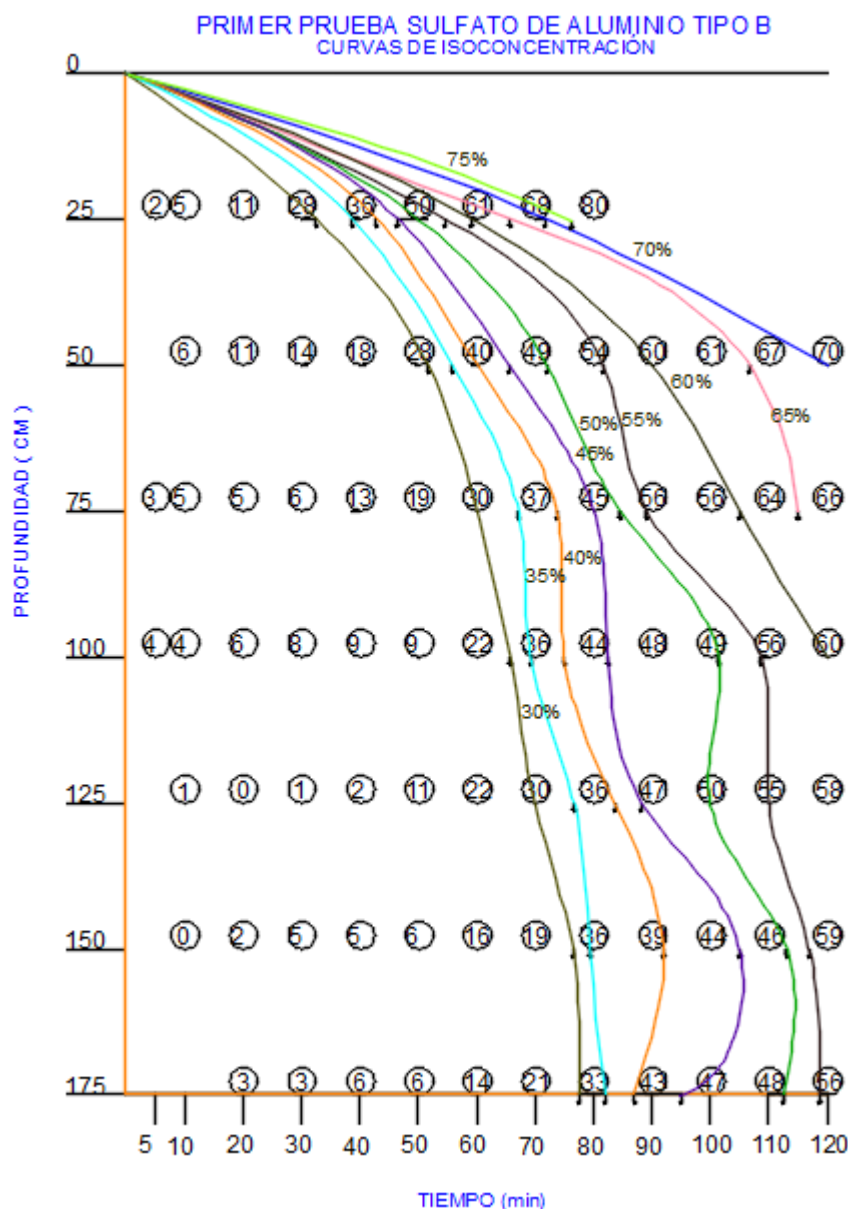
Tabla 30. 31 % de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo B a diferentes tiempos y profundidades.

		% de remoción						
tmin \ h(cm)		25	50	75	100	125	150	175
0		26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7
5		25,3	28,8	24,9	24,7	28	27,7	26,3
10		24,3	24,1	24,3	24,6	25,5	25,7	27,1
20		22,8	23	24,3	24,2	25,8	25,3	24,9
30		18,6	22	24,2	23,7	25,5	24,5	24,9
40		16,4	21,2	22,4	23,5	25,1	24,5	24,2
50		12,8	18,5	20,7	23,4	23	24,1	24,1
60		10	15,5	18,1	20	20	21,7	22
70		8,25	13	16,2	16,4	18,1	20,9	20,4
80		5,2	11,8	14,2	14,5	16,4	16,5	17,3
90			10,2	11,3	13,3	13,6	15,7	14,6
100			9,97	11,2	13	12,8	14,4	13,6
110			8,43	9,28	11,4	11,6	14	13,3
120			7,62	8,61	10,2	10,7	10,6	11,4

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenido el porcentaje de remoción del coagulante para los diferentes tiempos y profundidades, se procede a graficar las curvas de isoconcentración. Vistas en la figura 26.

Figura 26. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo B.



Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El tiempo es una variable representativa para obtener un porcentaje de remoción significativo, el mayor porcentaje de remoción obtenido en esta prueba fue de 80% para una profundidad de 25 cm y un tiempo de 80 minutos. Así mismo se observó una variación en la turbiedad del agua problema causada por la mezcla rápida y lenta que se ven representadas en los primeros 5 minutos, la cual se puede ver con mayor claridad en la tabla 30.

Teniendo las curvas de isoconcentración graficadas, se procede a referenciar coordenadas cartesianas para cada una de las curvas, hallando las profundidades tomando tiempos de cada 5 minutos. Lo anteriormente dicho se puede observar en la tabla 32.

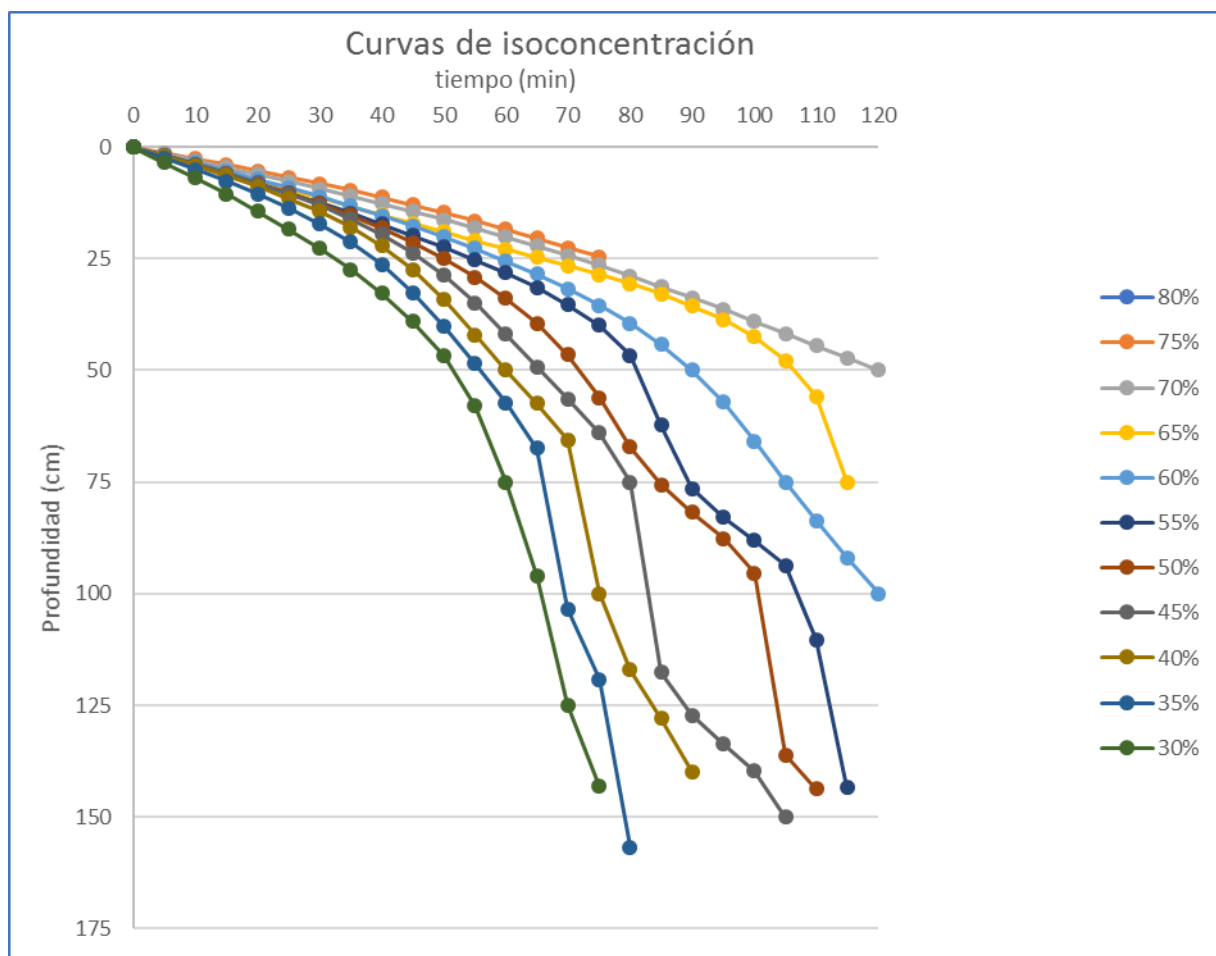
Tabla 32. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.

PRIMER PRUEBA SULFATO DE ALUMINIO TIPO B											
% de remoción											
tmin	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		1.31	1.52	1.91	1.78	2.01	1.93	1.92	2.08	2.48	3.45
10		2.63	3.04	3.82	3.57	4.04	3.89	3.88	4.20	5.02	6.95
15		3.97	4.58	5.73	5.38	6.10	5.91	5.93	6.44	7.67	10.56
20		5.34	6.14	7.64	7.24	8.19	8.03	8.11	8.83	10.52	14.33
25		6.74	7.72	9.55	9.16	10.35	10.27	10.47	11.47	13.66	18.35
30		8.18	9.33	11.45	11.14	12.58	12.67	13.10	14.46	17.20	22.68
35		9.70	10.98	13.35	13.22	14.89	15.29	16.07	17.93	21.30	27.45
40		11.27	12.68	15.26	15.40	17.30	18.17	19.53	22.13	26.37	32.81
45		12.92	14.44	17.16	17.70	19.82	21.38	23.66	27.45	32.65	39.06
50		14.66	16.25	19.05	20.14	22.47	25.00	28.75	34.24	40.19	46.82
55		16.49	18.13	20.95	22.74	25.26	29.13	34.92	42.09	48.57	57.92
60		18.43	20.09	22.84	25.52	28.22	33.91	41.92	50.00	57.26	75.00
65		20.46	22.13	24.73	28.52	31.50	39.56	49.21	57.35	67.51	95.96
70		22.54	24.26	26.62	31.80	35.28	46.58	56.34	65.63	103.45	125.00
75		24.65	26.50	28.57	35.43	39.97	56.12	64.03	100.00	119.16	143.17
80			28.84	30.65	39.53	46.65	67.19	75.00	117.03	156.82	
85			31.28	32.95	44.28	62.22	75.63	117.61	127.89		
90			33.79	35.56	50.00	76.54	81.77	127.23	139.82		
95			36.38	38.67	57.18	82.86	87.62	133.73			
100			39.03	42.55	65.80	88.04	95.37	139.70			
105			41.73	47.75	75.00	93.72	136.11	150.00			
110			44.47	55.88	83.70	110.28	143.70				
115			47.23	75.00	91.96	143.46					
120			50.00		100.00						

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas para cada una de las curvas de % de remoción, se procede a graficar nuevamente los valores obtenidos. Dando como resultado una nueva grafica que representa cada una de las curvas. De estas es obtenida una curva de tendencia junto a una ecuación polinómica de grado 2 y cada una con su respectiva correlación que simboliza su grado de exactitud. Las graficas generadas por las nuevas coordenadas cartesianas en función del tiempo de remoción y de la profundidad se pueden evidenciar en la figura 27.

Figura 27. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo B.



Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.4.3.2 Segunda prueba de sulfato de aluminio tipo B.

Teniendo en cuenta que el agua es un fluido que cambia constantemente, debido a cambios climáticos, se debe medir las propiedades físicas químicas representadas a continuación en la tabla 33.

Tabla 33. Propiedades del agua problema para prueba de Sulfato de aluminio tipo B.

Propiedades del agua	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	72
Resistencia ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	13,92
S.S (mg/L)	38,2
Salinidad	0
T ($^{\circ}\text{C}$)	17
PH	7,48
Oxígeno (mg/L)	1,02
%Oxígeno (%)	14,3

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Como se mencionó anteriormente, la variable a evaluar en principio es la turbiedad, para un tiempo máximo de 120 minutos y una profundidad máxima de 175 centímetros. El comportamiento del coagulante para esta situación se ven representados en la siguiente tabla 34.

Tabla 34. Turbiedad en (NTU) para diferentes tiempos y profundidades.

		TURBIEDAD (NTU)						
tmin \ h (cm)		0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
0		28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
5		25,8	25,4	24,5	26,2	27	27,6	29,8
10		25,1	25,11	24,1	25,5	28	26	29,3
20		22,1	24,1	25,4	24,9	25,2	26,3	26,9
30		16	23	23,7	24,6	24,9	27,4	26,6
40		11,4	19,6	20,9	23,8	24,8	25,1	28,1
50		7,93	16,2	20,7	23,6	27,5	25,62	30,5
60		5,84	13,5	14,6	17,9	20,1	21,8	22,6
70		6,73	12,3	16,4	16,9	17,11	18,9	23,5
80			11,11	13,2	10,6	18,4	14,2	21,5
90			9,58	9,67	10,3	16,8	11,7	16,9
100			9,25	9,76	10,8	11	12,4	17
110			7,47	8,97	8,85	9,41	13	12,8
120			7,59	6,68	8,29	10,4	10,5	10,9

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez terminada la medición de la turbiedad para diferentes tiempos y profundidades, se calcula el porcentaje de remoción que produce el sulfato de aluminio tipo B en el agua problema trabajada. Esto teniendo en cuenta que la turbiedad inicial trabajada fue de 26.8 NTU. El porcentaje de remoción dado para los tiempos y profundidades están determinados en la siguiente tabla 35.

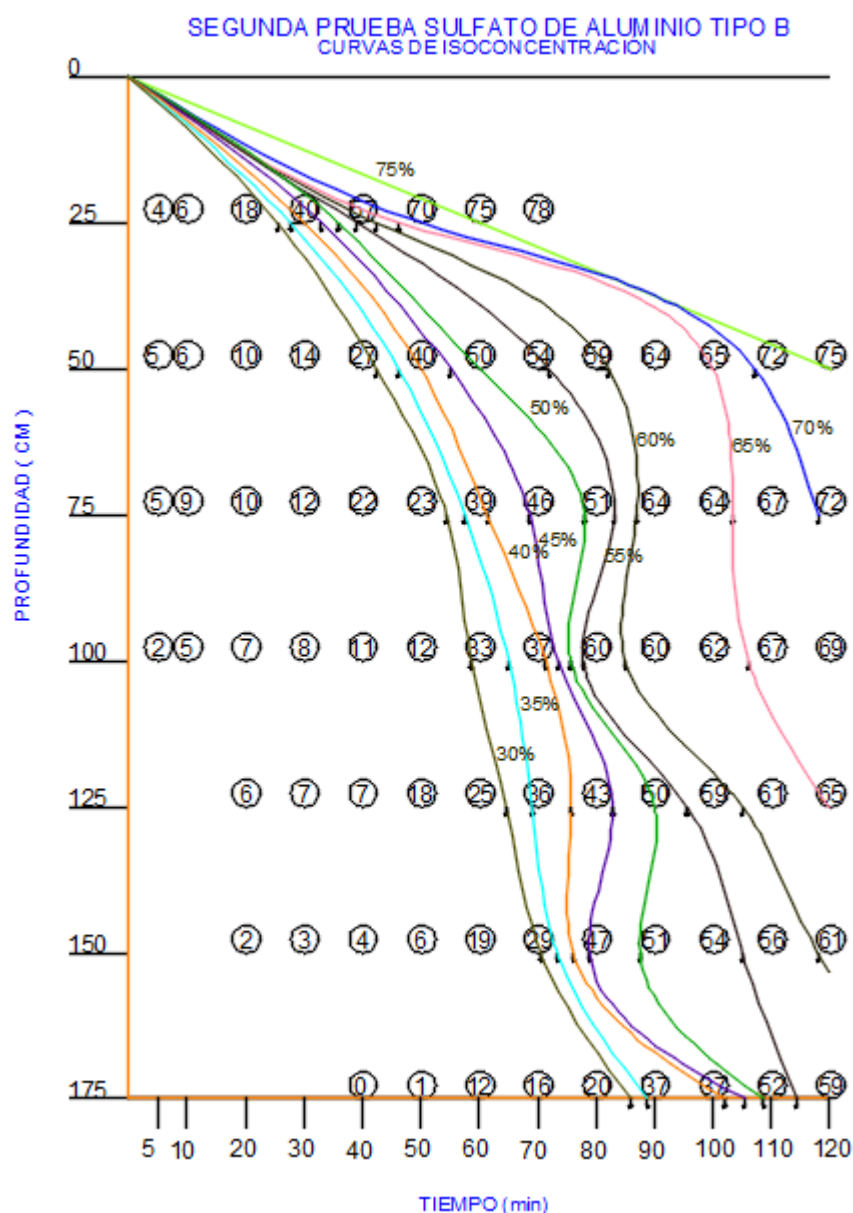
Tabla 35. % de remoción causadas por el sulfato de aluminio tipo B a diferentes tiempos y profundidades.

		% de remoción						
tmin \ h(cm)		25	50	75	100	125	150	175
0		-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
5		4	5	5	2	-4	-3	-4
10		6	6	9	5	-1	-2	-4
20		18	10	10	7	6	2	-3
30		40	14	12	8	7	3	-1
40		57	27	22	11	7	4	0
50		70	40	23	12	18	6	1
60		75	50	39	33	25	19	12
70		78	54	46	37	36	29	16
80			59	51	60	43	47	20
90			64	64	60	50	51	37
100			65	64	62	59	54	37
110			72	67	67	61	56	52
120			75	72	69	65	61	59

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenido el porcentaje de remoción del coagulante para los diferentes tiempos y profundidades, se procede a graficar las curvas de isoconcentración. Vistas en la figura 28.

Figura 28. Curvas de isoconcentración generadas por sulfato de aluminio tipo B.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El tiempo es una variable representativa para obtener un porcentaje de remoción significativo, el mayor porcentaje de remoción obtenido en esta prueba fue de 78% para una profundidad de 25 cm y un tiempo de 70 minutos. Así mismo se observó una variación en la turbiedad del agua problema causada por la mezcla rápida y lenta que se ven representadas en los primeros 5 minutos, la cual se puede ver con mayor claridad en la tabla 34.

Teniendo las curvas de isoconcentración graficadas, se procede a referenciar coordenadas cartesianas para cada una de las curvas, hallando las profundidades tomando tiempos de cada 5 minutos. Lo anteriormente dicho se puede observar en la tabla 36.

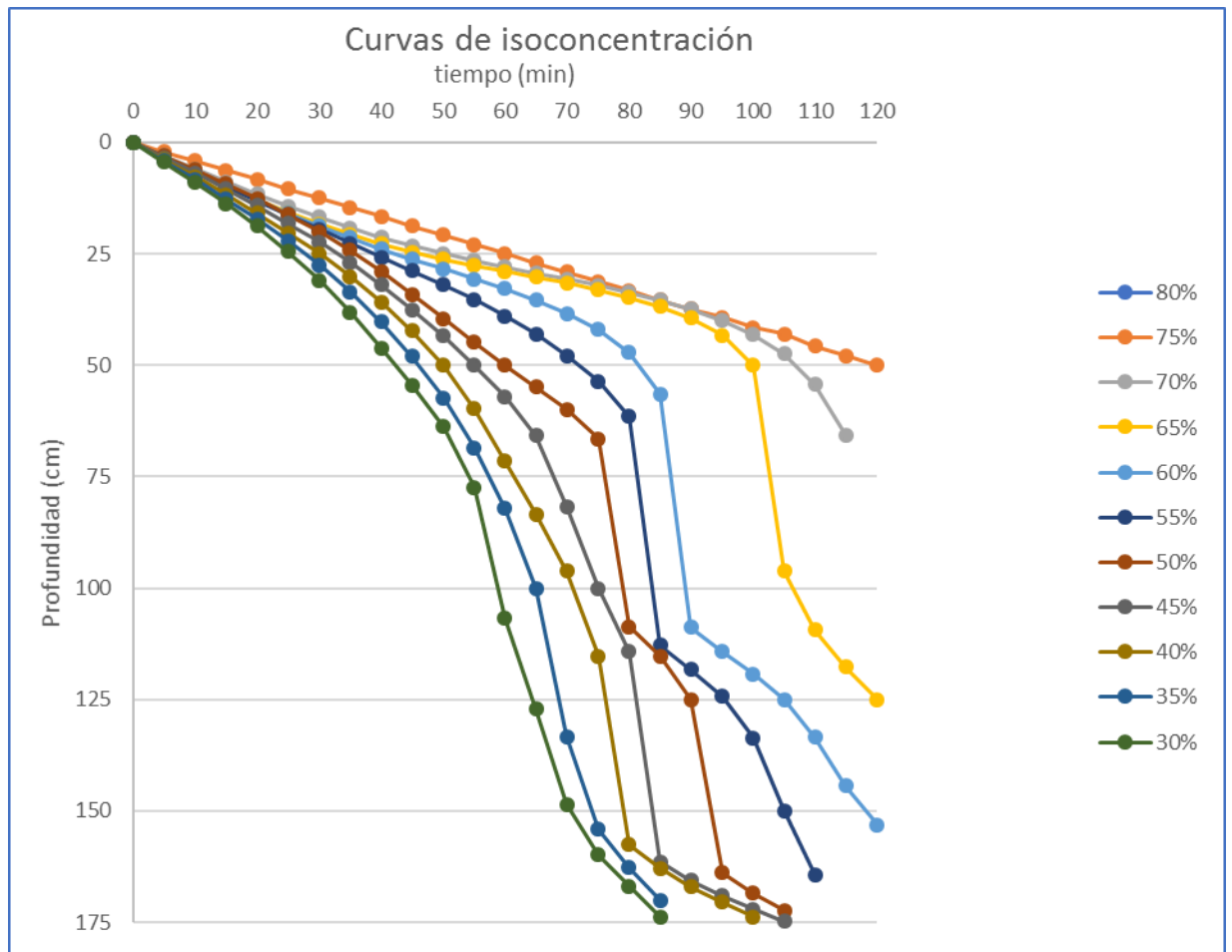
Tabla 36. Coordenadas cartesianas, para cada curva de % de remoción.

SEGUNDA PRUEBA SULFATO ALUMINIO TIPO B											
% de remoción											
tmin	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		2.08	3.00	3.38	3.32	3.28	3.05	3.44	3.85	4.13	4.44
10		4.17	5.96	6.70	6.61	6.56	6.14	6.93	7.75	8.33	8.97
15		6.25	8.86	9.89	9.83	9.82	9.33	10.50	11.75	12.68	13.71
20		8.34	11.65	12.92	12.94	13.06	12.66	14.22	15.91	17.24	18.80
25		10.42	14.31	15.74	15.92	16.28	16.19	18.15	20.30	22.14	24.44
30		12.51	16.81	18.32	18.76	19.47	20.00	22.36	25.00	27.50	30.89
35		14.59	19.15	20.68	21.42	22.62	24.21	26.94	30.11	33.48	38.19
40		16.67	21.30	22.77	23.91	25.73	28.93	31.98	35.78	40.24	46.17
45		18.76	23.25	24.60	26.22	28.82	34.12	37.49	42.25	48.02	54.54
50		20.84	25.00	26.19	28.41	31.98	39.53	43.50	50.00	57.28	63.80
55		22.92	26.56	27.61	30.60	35.33	44.90	50.00	59.82	68.51	77.40
60		25.00	27.99	28.93	32.89	38.97	50.00	57.11	71.55	82.17	106.79
65		27.08	29.36	30.24	35.41	43.07	54.83	65.75	83.49	100.00	127.10
70		29.16	30.72	31.59	38.35	47.84	59.93	81.71	96.17	133.39	148.47
75		31.24	32.14	33.06	42.03	53.61	66.47	100.00	115.29	154.11	159.90
80		33.32	33.67	34.76	47.14	61.50	108.73	114.23	157.53	162.67	166.91
85		35.41	35.40	36.81	56.48	112.78	115.32	161.41	162.92	170.01	173.81
90		37.44	37.47	39.47	108.84	118.22	125.00	165.62	167.00		
95		39.24	39.93	43.25	114.23	124.22	163.93	168.99	170.50		
100		41.62	43.13	50.00	119.23	133.59	168.41	171.98	173.73		
105		43.07	47.51	96.18	125.00	150.00	172.30	174.81			
110		45.78	54.31	109.40	133.40	164.36					
115		47.86	65.70	117.70	144.31						
120		50.00		125.00	153.16						

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas para cada una de las curvas de % de remoción, se procede a graficar nuevamente los valores obtenidos. Dando como resultado una nueva gráfica que representa cada una de las curvas. De estas es obtenida una curva de tendencia junto a una ecuación polinómica de grado 2 y cada una con su respectiva correlación que simboliza su grado de exactitud. Las gráficas generadas por las nuevas coordenadas cartesianas en función del tiempo de remoción y de la profundidad se pueden evidenciar en la figura 29.

Figura 29. Curvas de isoconcentración para sulfato de aluminio tipo B.



Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.5 ANÁLISIS DEL %DE REMOCIÓN OBTENIDO CON LOS COAGULANTES TRABAJADOS EN EL AGUA PROBLEMA

A continuación, se analizan las curvas generadas, a 80%, 75%, 70%, y 65% de remoción, por los tres coagulantes utilizados (cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B).

Siendo:

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ Tipo A-1, la curva generada en la primera prueba para sulfato de aluminio tipo A, con un porcentaje de remoción determinado.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ Tipo A-2, la curva generada en la segunda prueba para sulfato de aluminio tipo A, con un porcentaje de remoción determinado.

FeCl_3 -1, la curva generada para la primera prueba de cloruro férrico, con un porcentaje de remoción determinado.

FeCl_3 -2, la curva generada para la segunda prueba de cloruro férrico, con un porcentaje de remoción determinado.

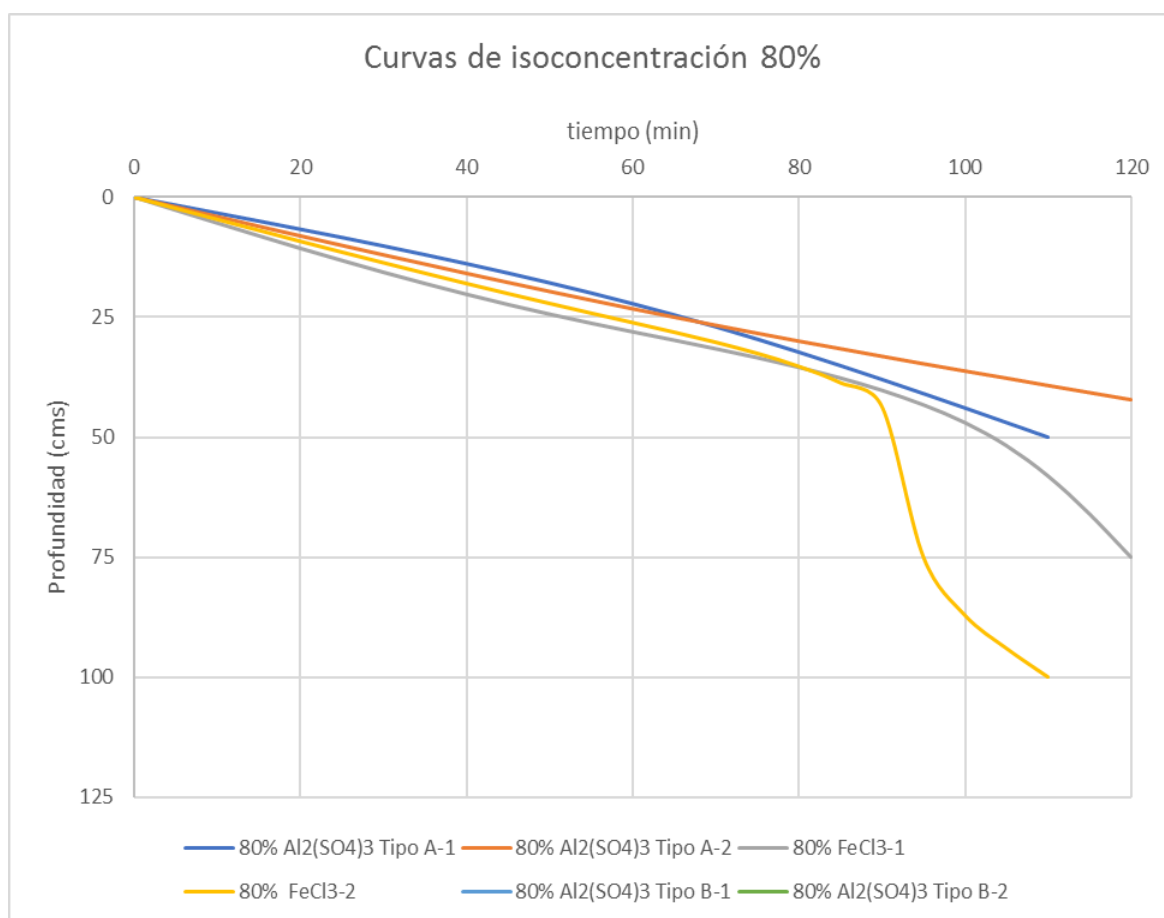
$\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ Tipo B-1, la curva generada en la primera prueba para sulfato de aluminio tipo B, con un porcentaje de remoción determinado.

$\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ Tipo B-2, la curva generada en la segunda prueba para sulfato de aluminio tipo B, con un porcentaje de remoción determinado.

3.5.1 Curvas de isoconcentración para 80% de remoción.

Análisis Curvas de isoconcentración para 80% de remoción, utilizando cloruro férrico y sulfato de aluminio tipo A. En la figura 30. Se observa el comportamiento de cada una de las curvas, cada una teniendo dos pruebas diferentes.

Figura 30. Curvas de isoconcentración para 80% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.



Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

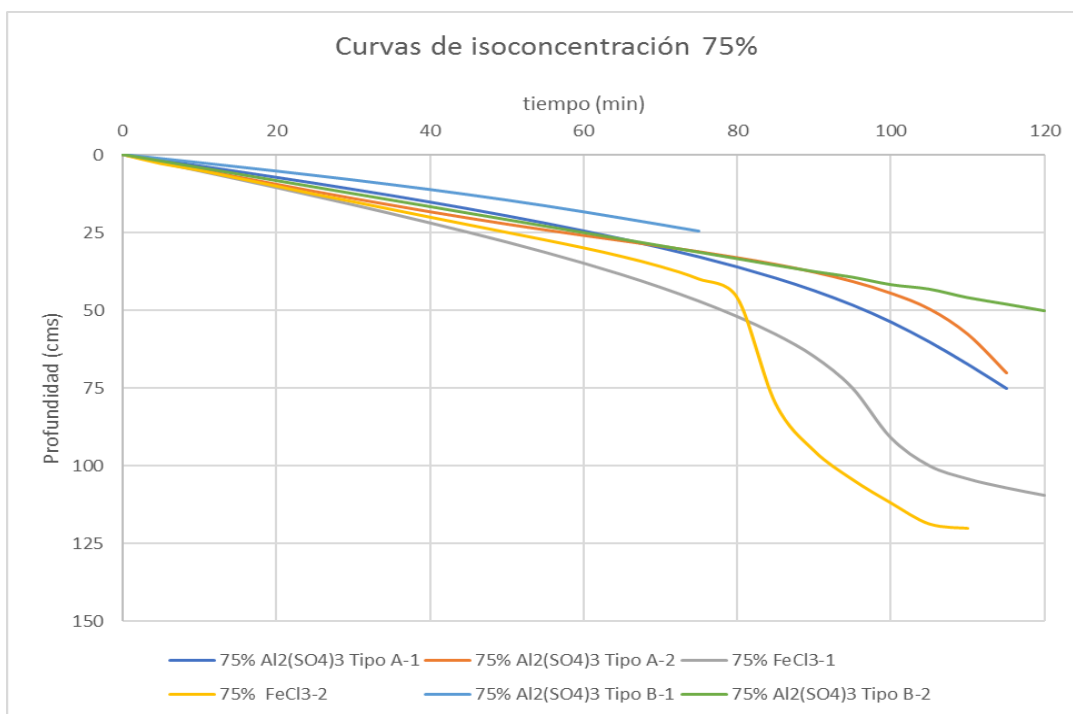
Según la figura mostrada anteriormente se observa que el cloruro férrico tiene una mayor efectividad en la remoción. Logrando que a 25 metros de profundidad sea logrado el 80% de esta y completado a un tiempo promedio de 55 minutos. El sulfato de aluminio tipo A tiene menos efectividad en la remoción y logra que ésta sea lograda máximo a una profundidad promedio de 50 metros. Por lo contrario, el Cloruro férrico logra para esta misma remoción una mayor profundidad, teniendo en cuenta una de sus pruebas como 100 y otros 75 metros.

El sulfato de aluminio es el coagulante que menor efectividad en la remoción presentó, ya que en las dos pruebas efectuadas no fue logrado el 80% de remoción para ninguna de las profundidades de muestra tomadas.

3.5.2 Curvas de isoconcentración para 75% de remoción.

Análisis Curvas de isoconcentración para 75% de remoción, utilizando cloruro férrico y sulfato de aluminio tipo A. En la figura 31. Se muestra el comportamiento de cada una de las curvas, cada una teniendo dos pruebas diferentes.

Figura 31. Curvas de isoconcentración para 75% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.



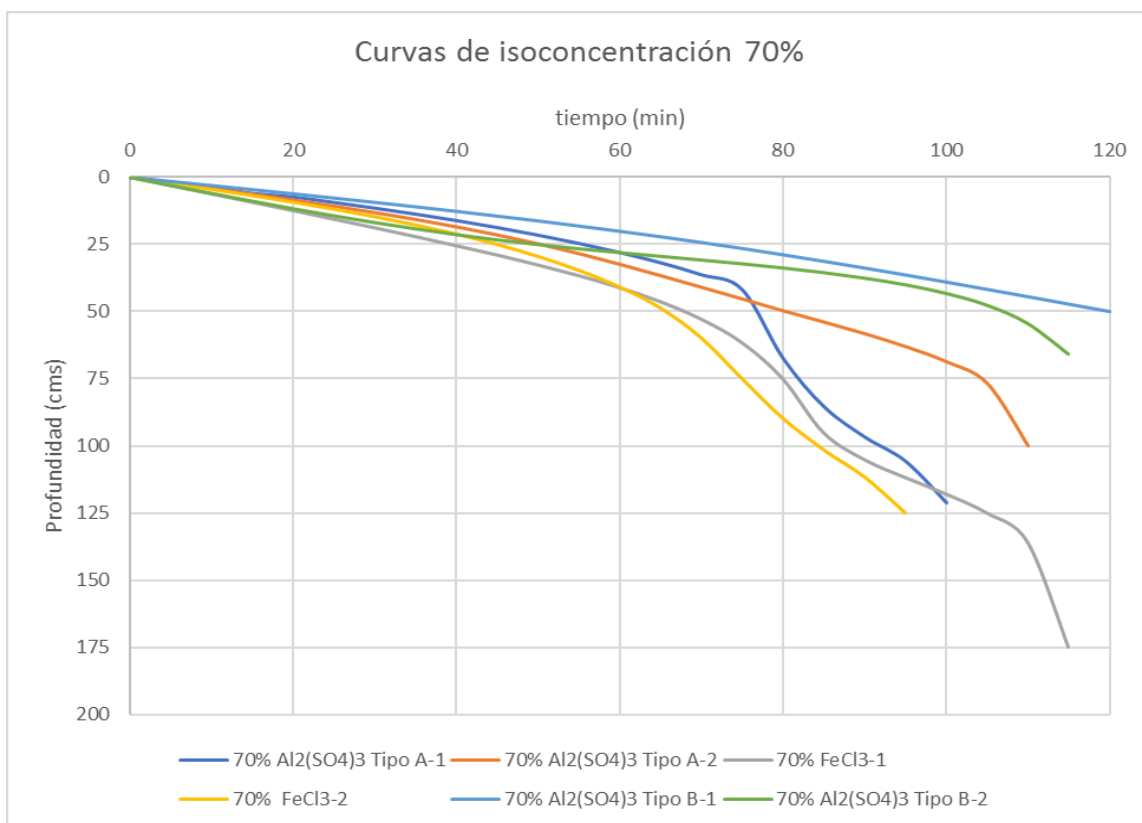
Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Según la figura mostrada anteriormente se observa que el cloruro férrico tiene una mayor efectividad en la remoción. Logrando que a 25, 50, 75 y 100 metros de profundidad sea logrado el 75% de esta y completado a un tiempo promedio de 45, 80, 90, 100 minutos respectivamente. El sulfato de aluminio tipo A tiene menos efectividad en la remoción y logra que esta sea lograda máximo a una profundidad promedio de 75 metros. Por otro lado, el sulfato de aluminio tipo B tiene una remoción del 75% a una profundidad máxima de 50 cm y esto lo logra en un tiempo promedio de 120 minutos.

3.5.3 Curvas de isoconcentración para 70% de remoción.

Análisis Curvas de isoconcentración para 70% de remoción, utilizando cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B. En la figura 32. Se muestra el comportamiento de cada una de las curvas, cada una teniendo dos pruebas diferentes.

Figura 32. Curvas de isoconcentración para 70% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.



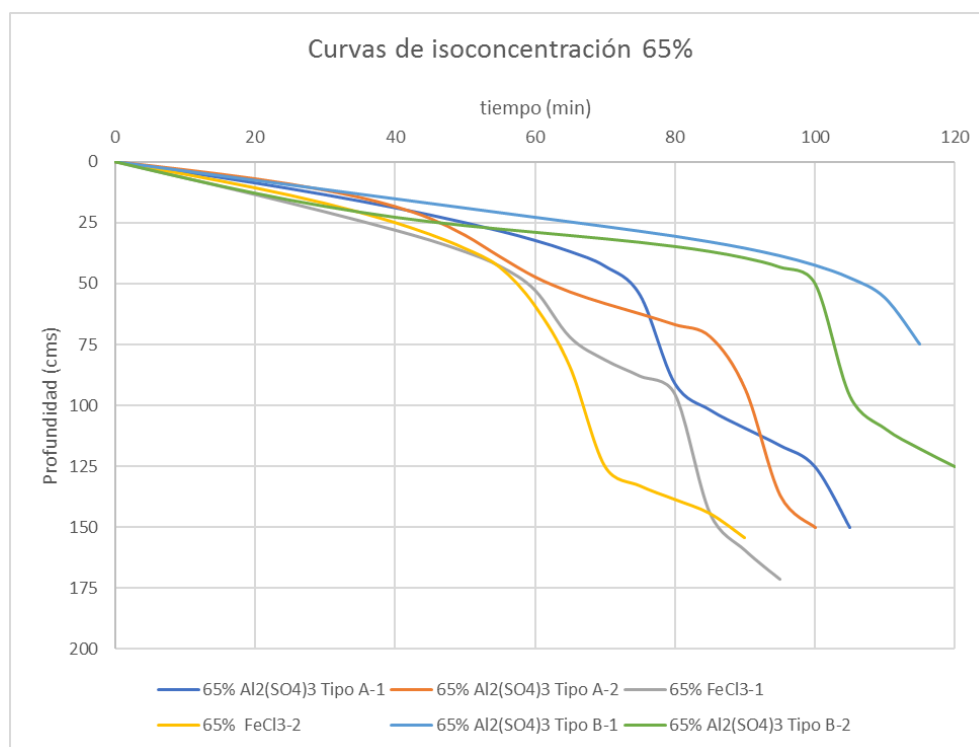
Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El cloruro férrico es el coagulante que mayor efectividad tiene para una remoción de 70%, logrando tiempos más bajos a mayores profundidades, la tendencia del cloruro férrico es de lograr por lo menos el 70% de remoción en todo el sistema. Caso contrario ocurre con los sulfatos de aluminio, tanto tipo A como tipo B, siendo el sulfato de aluminio tipo A el que segundo mejor comportamiento tiene, logrando una eficiencia en la remoción de 70% a una profundidad máxima de 100 metros y lograda a un tiempo promedio de 100 minutos. Por último, el coagulante que menor efectividad logró fue el sulfato de aluminio tipo B, logrando una remoción de 70% para una profundidad máxima de 50 metros, en un tiempo promedio de 110 minutos.

3.5.4 Curvas de isoconcentración para 65% de remoción.

Análisis Curvas de isoconcentración para 65% de remoción, utilizando cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B. En la figura 33. Se muestra el comportamiento de cada una de las curvas, cada una teniendo dos pruebas diferentes.

Figura 33. Curvas de isoconcentración para 65% de remoción, los tres coagulantes trabajados para sus dos pruebas realizadas.



Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

El cloruro férrico es el coagulante que mayor efectividad tiene para una remoción de 65%, logrando tiempos más bajos a mayores profundidades, la tendencia del cloruro férrico como se había mencionado anteriormente es de lograr por lo menos el 70% de remoción en todo el sistema. Así que para lograr una remoción del 65% es aún más fácil y rápido. Caso contrario ocurre con los sulfatos de aluminio, tanto tipo A como tipo B, como se mencionó en el anterior análisis.

3.6 PROPUESTA DE ECUACIONES

La propuesta de ecuaciones, es generada de acuerdo a las coordenadas cartesianas en función de la profundidad y el tiempo que fueron expuestas anteriormente. Graficadas estas coordenadas se generó una línea de tendencia mediante la herramienta Excel.

Se obtuvo una ecuación para cada una de las curvas encontradas entre un rango de remoción (80%-30%), cada 5%. Las ecuaciones generadas son polinómicas de grado 2, las cuales están en función de las variables h y t que representan la profundidad en centímetros y el tiempo de remoción en minutos, respectivamente. A continuación, se muestra las ecuaciones generadas para las dos prácticas que se hicieron de los tres tipos de coagulantes trabajados.

3.6.1 Cloruro férrico.

La propuesta de ecuaciones está generada para las dos pruebas realizadas en laboratorio, comparando las diferentes características de sedimentación que se pueden presentar.

3.6.1.1 Propuesta para primera prueba de cloruro férrico.

A continuación, se presentan una tabla resumen con las ecuaciones generadas a partir del análisis de las líneas de tendencia generadas.

Tabla 37. Ecuaciones propuestas para cloruro férrico.

Primera prueba Cloruro ferrico		
%remoción	Ecuación	Correlación
80	$h=0.0015t^2+0.3686t$	0.9674
75	$h=0.0057t^2+0.3439t$	0.9842
70	$h=0.0111t^2+0.0968t$	0.9829
65	$h=0.0203t^2-0.1878t$	0.9722
60	$h=0.0245t^2-0.1914t$	0.9778
55	$h=0.0255t^2-0.1405t$	0.9645
50	$h=0.0229t^2+0.1737t$	0.9699
45	$h=0.0365t^2-0.1734t$	0.9571
40	$h=0.0318t^2+0.1099t$	0.9419
35	$h=0.0311t^2+0.2772t$	0.9495
30	$h=0.0264t^2+0.9021t$	0.9981

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Teniendo en cuenta la tabla anterior de cloruro férrico, se desea comprobar las características de un sedimentador que sea capaz de remover el 80% de sólidos en un tiempo de 60 minutos, como se muestra a continuación.

$$h = 0.0015t^2 + 0.3686t$$

Siendo t=tiempo de remoción=60 minutos, se tiene que:

$$h = 0.0015 * (60min)^2 + 0.3686 * (60min)$$

$$h = 27.516\text{cm}$$

Siendo carga hidráulica:

$$Vs = Cs = \frac{h}{t}$$

Remplazando:

$$Cs = \left(\frac{0.275\text{m}}{60\text{min}}\right) * \left(\frac{60\text{min}}{1\text{hora}}\right) * \left(\frac{24\text{horas}}{1\text{dia}}\right) = 6.6\text{m}/\text{dia}$$

Área superficial:

$$As = \frac{Qd}{Cs}$$

Para un caudal de diseño de 100 l/s (8640m³/día) el área superficial será:

$$As = \frac{8640\text{ m}^3/\text{dia}}{6.6\text{m}/\text{dia}} = 1308\text{m}^2$$

Esto quiere decir que para lograr una efectividad en la remoción de un 80% utilizando como coagulante cloruro férrico, a un tiempo de 60 minutos, se requiere un sedimentador con una profundidad máxima de 27 cm. A su vez este sedimentador tendría una carga hidráulica de 6.6 m/día. Y de tratar un caudal de 100 l/s este tendría un área de sedimentación de 1308 m².

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se representa las características de un sedimentador bajo las mismas condiciones, para un porcentaje de remoción de 75%, 70%, 65% y 60%, vistos a continuación en la tabla 38.

Tabla 38. Características sedimentación utilizando cloruro férrico, bajo las condiciones expuestas.

Primera prueba Cloruro férrico			
% de remoción	h (cm)	Cs (m/día)	As (m²)
80	27.52	6.60	1308.33
75	41.15	9.88	874.76
70	45.77	10.98	786.58
65	61.81	14.83	582.41
60	76.72	18.41	469.26

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.6.1.2 Propuesta para segunda prueba de cloruro férrico.

Para la segunda prueba realizada de cloruro férrico, se observa en la tabla 38. Las ecuaciones para cada % de remoción trabajado, junto su correlación.

Tabla 39. Ecuaciones propuestas para cloruro férrico.

Segunda prueba Cloruro ferrico		
%remoción	Ecuación	Correlación
80	$h=0.0078t^2-0.0224t$	0.9180
75	$h=0.0112t^2-0.0847t$	0.9525
70	$h=0.0233t^2-0.2229t$	0.9637
65	$h=0.02233t^2-0.2229t$	0.9637
60	$h=0.0248t^2-0.1707t$	0.9767
55	$h=0.0267t^2-0.1001t$	0.9764
50	$h=0.0409t^2-0.5592t$	0.9799
45	$h=0.0394t^2-0.271t$	0.9841
40	$h=0.0409t^2-0.119t$	0.9707
35	$h=0.0452t^2-0.0371t$	0.9755
30	$h=0.0392t^2+0.5038t$	0.9619

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Teniendo en cuenta la tabla anterior de cloruro férrico, se desea comprobar las características de un sedimentador que sea capaz de remover el 80% de sólidos en un tiempo de 60 minutos, como se muestra a continuación.

$$h = 0.0078t^2 - 0.0224t$$

Siendo t=tiempo de remoción=60 minutos, se tiene que:

$$h = 0.0078 * (60min)^2 - 0.0224 * (60min)$$

$$h = 26.736\text{cm}$$

Siendo carga hidráulica:

$$Vs = Cs = \frac{h}{t}$$

Remplazando:

$$Cs = \left(\frac{0.267\text{m}}{60\text{min}}\right) * \left(\frac{60\text{min}}{1\text{hora}}\right) * \left(\frac{24\text{horas}}{1\text{dia}}\right) = 6.42\text{m}/\text{dia}$$

Área superficial:

$$As = \frac{Qd}{Cs}$$

Para un caudal de diseño de 100 l/s (8640m³/día) el área superficial será:

$$As = \frac{8640\text{ m}^3/\text{dia}}{6.42\text{m}/\text{dia}} = 1346\text{m}^2$$

Esto quiere decir que para lograr una efectividad en la remoción de un 80% utilizando como coagulante cloruro férrico, a un tiempo de 60 minutos, se requiere un sedimentador con una profundidad máxima de 26 cm. A su vez este sedimentador tendría una carga hidráulica de 6.42 m/día. Y de tratar un caudal de 100l/s este tendría un área de sedimentación de 1346 m².

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se representa las características de un sedimentador bajo las mismas condiciones, para un porcentaje de remoción de 75%, 70%, 65% y 60%, vistos a continuación en la tabla 40.

Tabla 40. Características sedimentación utilizando cloruro férrico, bajo las condiciones expuestas.

Segunda prueba Cloruro férrico			
% de remoción	h (cm)	Cs (m/día)	As (m²)
80	26.74	6.42	1346.50
75	35.24	8.46	1021.62
70	70.51	16.92	510.59
65	67.01	16.08	537.20
60	76.72	18.41	469.26

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.6.2 Sulfato de aluminio tipo A.

La propuesta de ecuaciones está generada para las dos pruebas realizadas en laboratorio, comparando las diferentes características de sedimentación que se pueden presentar.

3.6.2.1 Propuesta para primera prueba de sulfato de aluminio tipo A.

Para la primera prueba realizada de sulfato de aluminio tipo A, se observa en la tabla 41. Las ecuaciones para cada % de remoción trabajado, junto su correlación.

Tabla 41. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo A.

Primera prueba sulfato de aluminio tipo A		
%remoción	Ecuación	Correlación
80	$h=0.0016t^2+0.2798t$	0.9997
75	$h=0.0034t^2+0.2605t$	0.9874
70	$h=0.0144t^2-0.2931t$	0.9602
65	$h=0.01555t^2-0.2544t$	0.9706
60	$h=0.0238t^2-0.5341t$	0.9773
55	$h=0.0317t^2-0.7326t$	0.9685
50	$h=0.03t^2-0.4679t$	0.9705
45	$h=0.0565t^2-1.0293t$	0.9657
40	$h=0.0349t^2-0.1424t$	0.9830
35	$h=0.0478t^2-0.2849t$	0.9798
30	$h=0.0351t^2+0.2142t$	0.9813

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Teniendo en cuenta la tabla anterior de sulfato de aluminio tipo A, se desea comprobar las características de un sedimentador que sea capaz de remover el 80% de sólidos en un tiempo de 60 minutos, como se muestra a continuación.

$$h = 0.0016t^2 + 0.2798t$$

Siendo t =tiempo de remoción=60 minutos, se tiene que:

$$h = 0.0016 * (60min)^2 + 0.2798 * (60min)$$

$$h = 22.548cm$$

Siendo carga hidráulica:

$$Vs = Cs = \frac{h}{t}$$

Remplazando:

$$Cs = \left(\frac{0.225m}{60min}\right) * \left(\frac{60min}{1hora}\right) * \left(\frac{24horas}{1dia}\right) = 5.41m/dia$$

Área superficial:

$$As = \frac{Qd}{Cs}$$

Para un caudal de diseño de 100 l/s (8640m³/dia) el área superficial será:

$$As = \frac{8640 m^3/dia}{5.41m/dia} = 1596.6m^2$$

Esto quiere decir que para lograr una efectividad en la remoción de un 80% utilizando como coagulante sulfato de aluminio tipo A, a un tiempo de 60 minutos, se necesita un sedimentador de una profundidad máxima de 22 cm. A su vez este sedimentador tendría una carga hidráulica de 5.41 m/día. Y de tratar un caudal de 100 l/s este tendría un área de sedimentación de 1596.6 m².

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se representa las características de un sedimentador bajo las mismas condiciones, para un porcentaje de remoción de 75%, 70%, 65% y 60%, vistos a continuación en la tabla 42.

Tabla 42. Características sedimentación utilizando alumbre tipo A, bajo las condiciones expuestas.

Primera prueba sulfato de aluminio tipo A			
% de remoción	h (cm)	Cs (m/día)	As (m²)
80	22.55	5.41	1596.59
75	27.87	6.69	1291.71
70	34.25	8.22	1050.97
65	40.72	9.77	884.17
60	51.83	12.44	694.52

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.6.2.2 Propuesta para segunda prueba de sulfato de aluminio tipo A.

Para la segunda prueba realizada de sulfato de aluminio tipo A, se observa en la tabla 43. Las ecuaciones para cada % de remoción trabajado, junto su correlación.

Tabla 43. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo A.

Segunda prueba sulfato de aluminio tipo A		
%remoción	Ecuación	Correlación
80	$h = -0.0006t^2 + 0.4205t$	1.0000
75	$h = 0.0015t^2 + 0.3316t$	0.9598
70	$h = 0.005t^2 + 0.2336t$	0.9829
65	$h = 0.015t^2 - 0.1837t$	0.9540
60	$h = 0.0183t^2 - 0.2691t$	0.9223
55	$h = 0.0208t^2 - 0.2068t$	0.9867
50	$h = 0.0227t^2 - 0.1697t$	0.9812
45	$h = 0.0247t^2 - 0.1206t$	0.9842
40	$h = 0.023t^2 + 0.1386t$	0.9709
35	$h = 0.0195t^2 + 0.4635t$	0.9557
30	$h = 0.0146t^2 + 0.8742t$	0.9337

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Teniendo en cuenta la tabla anterior de sulfato de aluminio tipo A, se desea comprobar las características de un sedimentador que sea capaz de remover el 80% de sólidos en un tiempo de 60 minutos, como se muestra a continuación.

$$h = -0.0006t^2 + 0.4205t$$

Siendo t=tiempo de remoción=60 minutos, se tiene que:

$$h = -0.0006 * (60min)^2 + 0.4205 * (60min)$$

$$h = 23.07cm$$

Siendo carga hidráulica:

$$V_s = C_s = \frac{h}{t}$$

Remplazando:

$$C_s = \left(\frac{0.231m}{60min}\right) * \left(\frac{60min}{1hora}\right) * \left(\frac{24horas}{1dia}\right) = 5.54m/dia$$

Área superficial:

$$A_s = \frac{Qd}{C_s}$$

Para un caudal de diseño de 100 l/s (8640m³/día) el área superficial será:

$$A_s = \frac{8640 \text{ m}^3/dia}{5.54m/dia} = 1560.5 \text{ m}^2$$

Esto quiere decir que para lograr una efectividad en la remoción de un 80% utilizando como coagulante sulfato de aluminio tipo A, a un tiempo de 60 minutos, se necesita un sedimentador de una profundidad máxima de 27 cm. A su vez este sedimentador tendría una carga hidráulica de 5.54 m/día. Y de tratar un caudal de 100 l/s este tendría un área de sedimentación de 1560.5 m².

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se representa las características de un sedimentador bajo las mismas condiciones, para un porcentaje de remoción de 75%, 70%, 65% y 60%, vistos a continuación en la tabla 44.

Tabla 44. Características sedimentación utilizando alumbre tipo A, bajo las condiciones expuestas.

Segunda prueba sulfato de aluminio tipo A			
% de remoción	h (cm)	Cs (m/día)	As (m²)
80	23.07	5.54	1560.47
75	25.30	6.07	1423.15
70	32.02	7.68	1124.44
65	42.98	10.31	837.64
60	49.73	11.94	723.85

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.6.3 Sulfato de aluminio tipo B.

La propuesta de ecuaciones está generada para las dos pruebas realizadas en laboratorio, comparando las diferentes características de sedimentación que se pueden presentar.

3.6.3.1 Propuesta para primera prueba de sulfato de aluminio tipo B.

Para la primera prueba realizada de sulfato de aluminio tipo B, se observa en la tabla 45. Las ecuaciones para cada % de remoción trabajado, junto su correlación.

Tabla 45. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo B.

Primera prueba sulfato de aluminio tipo B		
%remoción	Ecuación	Correlación
75	$h=0.0012t^2+0.2344t$	0.9998
70	$h=0.0013t^2+0.2606t$	0.9998
65	$h=0.0027t^2+0.2057t$	0.9455
60	$h=0.0061t^2+0.0599t$	0.9882
55	$h=0.0103t^2-0.1148t$	0.9699
50	$h=0.0119t^2-0.1063t$	0.9771
45	$h=0.0161t^2-0.1981t$	0.9773
40	$h=0.0203t^2-0.279t$	0.9808
35	$h=0.0271t^2-0.4506t$	0.9604
30	$h=0.0266t^2-0.2092t$	0.9742

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Teniendo en cuenta la tabla anterior de sulfato de aluminio tipo B, se desea comprobar las características de un sedimentador que sea capaz de remover el 75% de sólidos en un tiempo de 60 minutos, como se muestra a continuación.

$$h = 0.0012t^2 + 0.2344t$$

Siendo t =tiempo de remoción=60 minutos, se tiene que:

$$h = 0.0012 * (60min)^2 + 0.2344 * (60min)$$

$$h = 18.384cm$$

Siendo carga hidráulica:

$$Vs = Cs = \frac{h}{t}$$

Remplazando:

$$Cs = \left(\frac{0.184m}{60min}\right) * \left(\frac{60min}{1hora}\right) * \left(\frac{24horas}{1dia}\right) = 4.41m/dia$$

Área superficial:

$$As = \frac{Qd}{Cs}$$

Para un caudal de diseño de 100 l/s (8640m³/día) el área superficial será:

$$As = \frac{8640 m^3/dia}{4.41 m/dia} = 1958m^2$$

Esto quiere decir que para lograr una efectividad en la remoción de un 75% utilizando como coagulante sulfato de aluminio tipo B, a un tiempo de 60 minutos, se requiere un sedimentador con una profundidad máxima de 18 cm. A su vez este sedimentador tendría una carga hidráulica de 4.41 m/día. Y de tratar un caudal de 100 l/s este tendría un área de sedimentación de 1958 m².

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se representa las características de un sedimentador bajo las mismas condiciones, para un porcentaje de remoción de 75%, 70%, 65% y 60%, vistos a continuación en la tabla 46.

Tabla 46. Características sedimentación utilizando alumbre tipo B, bajo las condiciones expuestas.

Primera prueba sulfato de aluminio tipo B			
% de remoción	h (cm)	Cs (m/día)	As (m²)
75	18.38	4.41	1958.22
70	20.32	4.88	1772.00
65	22.06	5.29	1631.77
60	25.55	6.13	1408.78

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.6.3.2 Propuesta para segunda prueba de sulfato de aluminio tipo B.

Para la segunda prueba realizada de sulfato de aluminio tipo B, se observa en la tabla 47. Las ecuaciones para cada % de remoción trabajado, junto su correlación.

Tabla 47. Ecuaciones propuestas para sulfato de aluminio tipo B.

Segunda prueba sulfato de aluminio tipo B		
%remoción	Ecuación	Correlación
75	$h = -0.00002t^2 + 0.4175t$	0.9999
70	$h = 0.0002t^2 + 0.4521t$	0.9503
65	$h = 0.0078t^2 - 0.0231t$	0.8548
60	$h = 0.0113t^2 - 0.043t$	0.9492
55	$h = 0.0142t^2 - 0.0926t$	0.9664
50	$h = 0.0168t^2 - 0.0823t$	0.9727
45	$h = 0.0164t^2 + 0.1394t$	0.9706
40	$h = 0.0162t^2 + 0.3172t$	0.9754
35	$h = 0.0235t^2 + 0.106t$	0.9859
30	$h = 0.0215t^2 + 0.3956t$	0.9845

Fuente: (Ordúz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

Teniendo en cuenta la tabla anterior de sulfato de aluminio tipo B, se desea comprobar las características de un sedimentador que sea capaz de remover el 75% de sólidos en un tiempo de 60 minutos, como se muestra a continuación.

$$h = -0.00002t^2 + 0.4175t$$

Siendo t=tiempo de remoción=60 minutos, se tiene que:

$$h = 0.00002 * (60min)^2 + 0.4175 * (60min)$$

$$h = 24.98cm$$

Siendo carga hidráulica:

$$V_s = C_s = \frac{h}{t}$$

Remplazando:

$$C_s = \left(\frac{0.2498m}{60min} \right) * \left(\frac{60min}{1hora} \right) * \left(\frac{24horas}{1dia} \right) = 5.99m/dia$$

Área superficial:

$$A_s = \frac{Qd}{C_s}$$

Para un caudal de diseño de 100 l/s (8640m³/día) el área superficial será:

$$A_s = \frac{8640 \text{ m}^3/dia}{5.99 \text{ m/dia}} = 1441 \text{ m}^2$$

Esto quiere decir que para lograr una efectividad en la remoción de un 75% utilizando como coagulante sulfato de aluminio tipo B, a un tiempo de 60 minutos, se requiere un sedimentador con una profundidad máxima de 24 cm. A su vez este sedimentador tendría una carga hidráulica de 5.99 m/día. Y de tratar un caudal de 100 l/s este tendría un área de sedimentación de 1441 m².

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se representa las características de un sedimentador bajo las mismas condiciones, para un porcentaje de remoción de 75%, 70%, 65% y 60%, vistos a continuación en la tabla 48.

Tabla 48. Características sedimentación utilizando alumbre tipo B, bajo las condiciones expuestas.

Segunda prueba sulfato de aluminio tipo B			
% de remoción	h (cm)	Cs (m/día)	As (m²)
75	24.98	5.99	1441.27
70	27.85	6.68	1292.82
65	26.69	6.41	1348.62
60	38.10	9.14	944.88

Fuente: (Orduz Oscar, Portilla Jessica, 2017)

3.6.4 Análisis.

Según el análisis anterior, el cloruro férrico es el coagúlate que mejor comportamiento tiene para el agua problema tratada, ofreciendo una mayor profundidad de sedimentación, para porcentajes de remoción iguales o muy cercanos. Siendo el sulfato de aluminio tipo A el segundo mejor coagulante, estando muy cerca de lo que logra el cloruro férrico.

Las ecuaciones generadas para cada uno de los coagulantes (cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B) para un rango de (80%-30%) de remoción. Permiten la facilidad del cálculo de la profundidad del sedimentador, encontrados entre (0-1.75) metros y para diferentes tiempos de remoción entre (0-120) minutos. Esto quiere decir que, dependiendo del coagulante y el porcentaje de remoción deseado, es posible calcular la profundidad o el tiempo de remoción para unas características deseadas.

4. CONCLUSIONES

- El montaje experimental en laboratorio fue exitoso, la torre de sedimentación se comportó de la mejor manera y las partículas floculentas generadas en el agua problema, sedimentó en óptimas condiciones luego de las mezclas rápida y lenta.
- El comportamiento de las curvas de isoconcentración generadas para cada uno de los tres coagulantes analizados es acorde a las variables trabajadas de profundidad, tiempo y porcentaje de remoción. Comprobando que el porcentaje de remoción de sólidos en el agua problema es directamente proporcional al tiempo de sedimentación.
- Después del análisis de los tres coagulantes, se tiene que aquel coagulante que mejor comportamiento tuvo en la remoción de partículas floculentas es el cloruro férrico, utilizando una concentración de 75 ml/L logró un porcentaje en la remoción de por lo menos 70% en toda la columna de sedimentación a un tiempo de 120 minutos. Seguido del sulfato de aluminio tipo A y finalmente el sulfato de aluminio tipo B.
- Se generaron 64 ecuaciones en función del coagulante trabajado (Cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B) y a su vez del porcentaje de remoción que varían entre 80% y 30%.
- Según lo expuesto en los análisis de las ecuaciones generadas, se tiene que, para un porcentaje de remoción de 80% y un caudal de diseño de 100 l/s, las características del sedimentador (carga superficial, tiempo de remoción, área superficial y profundidad) utilizando una concentración de 75ml/L de cloruro férrico, son: 6.60 m/día de carga superficial, 60 minutos de tiempo de remoción, 1308.33 m² de área superficial y 27 centímetros de profundidad. Aunque la metodología expuesta en este proyecto resulta buena, no es posible utilizarla en todas las plantas de tratamiento; dependerá de las características de la fuente de abastecimiento de dicha planta.
- Las curvas de isoconcentración, deben hacerse teniendo en cuenta el tipo de agua que trabaja cada planta de tratamiento de agua potable, según la metodología realizada en la torre de sedimentación, para poder optimizar el proceso de eliminación de floc.

5. RECOMENDACIONES

- ❖ Como se generaron 2 ecuaciones por cada coagulante (cloruro férrico, sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B). Se recomienda manejar un rango de aplicación, ya que la sedimentación de partículas floculentas no se pueden definir como un solo comportamiento. Es decir que se deberá comparar las ecuaciones formuladas para el mismo porcentaje de remoción y manejar el rango dado.
- ❖ Continuar la investigación con los cuatro tipos de sedimentación existentes, es decir: sedimentación tipo I (partículas discretas), tipo II (partículas floculentas), tipo III (zonal) y tipo IV (compresión). Utilizando diferentes aguas problema, coagulante, concentración, turbiedad, pH y temperatura.

REFERENCIAS

Academia Nacional de Ciencias. 2007. El agua potable segura es esencial. [En línea] 2007. [Citado el: 28 de octubre de 2016.] <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation-technologies.html>.

AGUASISTEC. 2016. Planta de tratamiento de agua potable- PTAP. [En línea] 2016. [Citado el: 29 de Octubre de 2016.] <http://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-agua-potable.php>.

Alegría, Mónica. 2005. *Planta potabilizadora*. Buenos Aires : Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2005.

Beltran, Luis. 2011. Turbiedad, floculacion y sedimentacion de aguas. [En línea] 12 de Diciembre de 2011. [Citado el: 2 de Noviembre de 2016.] <http://procesosdeclarificaciodelagua.blogspot.com.co/>.

CEPIS. 2016. La calidad fisicoquímica del agua y su influencia en el tratamiento. [En línea] 2016. [Citado el: 2 de Noviembre de 2016.] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan3/042019/042019-02.pdf>.

—. 2002. *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua: manual de capacitación para operadores*. Lima : s.n., 2002. 862 p. (OPS/CEPIS/PUB/02.76).

Etienne, Ing. Guillermo. 2009. POTABILIZACION Y TRATAMIENTO DE AGUA. [En línea] 2009. [Citado el: 02 de Abril de 2017.] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/potabytrat.pdf>.

Farrás, Luis E. Pérez. 2015. TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN. [En línea] Agosto de 2015. [Citado el: 25 de Octubre de 2016.] http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teoria_sedimentacion.pdf.

IMAGUA. 2013. WATER TECHNOLOGIES. [En línea] 2013. [Citado el: 30 de Octubre de 2016.] <http://www.imagua.es/pages/index/sedimentacion>.

IRNE ALEJANDRO MANRIQUE, JHON MARCOS GOMEZ. 2016. CONSTRUCCION DE UNA TORRE DE SEDIMENTACION PARA LA EVALUACION DE LOS PROCESOS DE REMOCION Y EFICIENCIA EN TRATAMIENTOS DE AGUA POTABLE. Bogotá : s.n., 2016. pág. 52.

LENNTech. 2016. WATER TREATMENT. [En línea] 2016. [Citado el: 1 de Noviembre de 2016.] <http://www.lenntech.es/ph-y-alcalinidad.htm>.

Maldonado Yactayo, Víctor. 2016. SEDIMENTACIÓN. [En línea] 2016. [Citado el: 21 de Octubre de 2016.] http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomoll/ma1_tomo2_cap7.pdf.

Montoya, Carolina, y otros. 2011. *Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización.* no.16, Envigado : Revista EIA, 2011. 1794-1237.

PCE. 2016. turbidimetro. [En línea] 2016. [Citado el: 1 de Noviembre de 2016.] https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/turbidimetro-kat_70147_1.htm.

Perez, Jorge Arturo. 1981. *Sedimentacion.* Medellin : s.n., 1981.
—. 2016. *TRATAMIENTO DE AGUAS.* Bogotá : s.n., 2016.

Pérez, Vianney. 2015. Diferencia entre calibración, ajuste y verificación. [En línea] 13 de Enero de 2015. [Citado el: 16 de Noviembre de 2016.] <http://www.calibrabien.com/Calibracion-de-instrumentos-de-medicion/diferencia-entre-calibracion-verificacion-ajuste-desescalibrado>.

PIGNATTA, Danilo Andrés Ríos. 1998. UTILIZACIÓN DEL PARÁMETRO "EFICIENCIA" EN REMOCION DE TURBIEDAD DE LOS SEDIMENTADORES. [En línea] AIDIS, 5 de NOV de 1998. [Citado el: 30 de octubre de 2016.] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/peru/urgapa006.pdf>.

Rojas, Jairo Alberto Romero. 1999. *POTABILIZACIÓN DEL AGUA*. México,D.F. : ALFAOMEGA, 1999. Vol. 3a. edición.

Salinas, Gonzalo Salas. 2012. *Comportamiento de la sedimentación en un sistema de micropartículas. no.2*, México : Ingeniería Investigación y Tecnología, Junio de 2012, Vol. XIII, págs. 256-262. 1405-7743.

Salinas, Gonzalo Salas y Espinosa, Fernando Fuentes. 2012. *Evaluación experimental del comportamiento de la velocidad de sedimentación de partículas. no. 20*, Medellín : Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 2012, Vol. 11. 1692-3324.

Trujillo, Daniela, y otros. 2014. *Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. no.1*, Bucaramanga : Revista Ion, 2014, Vol. 27. 0120-100X.

UDLAP. 2017. Catarina. [En línea] Abril de 2017. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/capitulo2.pdf.

UPRM. 2016. PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: ALCALINIDAD. [En línea] 2016. [Citado el: 29 de octubre de 2016.] <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>.

VEGA Guzman, Juan Carlos y Villacreses Zambrano, Jose Alfredo. 2006. Estudio del Fenomeno de sedimentacion en el tratamiento del agua en tres casos de estudio". [En línea] 2006. [Citado el: 3 de Noviembre de 2016.] <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3406/1/5929.pdf>.

Zatarain del Castillo, Minerva. 1988. Tesis Uson. *Teoría de la sedimentación*. [En línea] 1988. [Citado el: 7 de Noviembre de 2016.] <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=911>.